

Entwicklung, Aufbau und Charakterisierung eines optischen Messplatzes mit integrierter Kalibrierung

Bachelorarbeit von Lars Gudjons

Tag der Einreichung: 25. März 2021

1. Gutachten: Prof. Dr. mont. Mario Kupnik

Betreuer: Romal Chadda M.Sc. und Claas Hartmann M.Sc.

Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Elektrotechnik
und Informationstechnik

Fachgebiet Mess- und
Sensortechnik

Entwicklung, Aufbau und Charakterisierung eines optischen Messplatzes mit integrierter Kalibrierung

1. Gutachten: Prof. Dr. mont. Mario Kupnik, Fachgebiet Mess- und Sensortechnik
Betreuer: Romal Chadda M.Sc. und Claas Hartmann M.Sc.

TU Darmstadt
Karolinenpl. 5
64289 Darmstadt

Fachgebiet Mess- und Sensortechnik

Bachelorthesis von Lars Gudjons
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Abgabe: 25. März 2021

Copyright © Alle Rechte vorbehalten.

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß §22 Abs. 7 und §23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Lars Gudjons, die vorliegende Bachelorarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Fall eines Plagiats (§38 Abs. 2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß §23 Abs. 7 APB überein.

Bei einer Thesis des Fachbereichs Architektur entspricht die eingereichte elektronische Fassung dem vorgestellten Modell und den vorgelegten Plänen.

Darmstadt, 25. März 2021

L. Gudjons

Kurzfassung

Optische Messsysteme finden breite Anwendung in der Wissenschaft und Industrie. Anwendungen sind beispielsweise das Prüfen von Fertigungstoleranzen oder die minimalinvasive Operation in der Medizintechnik. Optische Messsysteme verfügen gegenüber taktilen Systemen über einige Vorteile, wie die vergleichsweise hohe Geschwindigkeit oder die Rückwirkungsfreiheit der Messung. Die Genauigkeit optischer Messsysteme ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. Ein wichtiger Einflussfaktor ist hierbei die korrekte Kalibrierung des Systems, um systematische Messabweichungen zu eliminieren. Eine systematische Messabweichung solcher Systeme resultiert unter anderem durch Verzerrungen, die in einer Optik auftreten.

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines optischen Messsystems und seiner Kalibrierung. Die Anforderungen an das System sind ein Arbeitsbereich von maximal 30 cm auf 20 cm sowie eine hohe Flexibilität, um es an unterschiedliche Aufgaben anpassen zu können. Dafür werden zuerst die erforderlichen Grundlagen optischer Systeme erläutert und anschließend dementsprechende Hardware gewählt. Danach werden relevante Einflüsse genauer untersucht. So wird zum Beispiel der Einfluss der für die Kalibrierung genutzten Bilder betrachtet. Außerdem wird die Materialwahl des Kalibriermusters wie beispielsweise Aluminium oder Papier untersucht.

Als Erstes wird die Eignung verschiedener Systeme mittels der sich aus den Grundlagen ergebenden Faktoren und festgelegten Anforderungen verglichen. Dabei werden Faktoren wie Schärfe, Verzerrung und chromatische Aberration betrachtet. Der Fokus in dieser Arbeit liegt insbesondere auf der Schärfe des Systems, da diese der entscheidende Faktor für die erreichbare Auflösung ist. Schärfe ist ein Aspekt, der von verschiedenen Personen unterschiedlich wahrgenommen wird. Deshalb wird aufgezeigt, wie die Schärfe eines optischen Systems anhand von Messwerten verglichen werden kann. Die final gewählte Hardware besteht aus einer Sony Alpha 7R4 als Kamera und einem Sony 90 mm F2.8 als Objektiv.

Anschließend wird das System mit der ausgewählten Hardware aufgebaut und eine Software zur Kalibrierung des Systems entwickelt. Dabei wird die Kamerakalibrierung nach Zhang verwendet. Danach wird die Software implementiert, mit welcher die Vermessung mit dem System erfolgt. Dies wird in dieser Arbeit durch einen „Canny Edge Detector“ realisiert. Nach der Fertigstellung des Gesamtsystems aus Hardware und Software werden die genannten Einflussfaktoren auf die Kalibrierung und die Messung analysiert.

Dabei ergibt sich, dass eine Kalibrierung des Systems mittels eines Kalibriermusters aus Papier den Abbildungsfehler durch Verzerrungen um 76% reduzieren kann. Bei einer Kalibrierung mittels eines Kalibriermusters aus Aluminium wird der Abbildungsfehler um 87% reduziert. Die durchschnittlich bleibende Messabweichung durch Verzerrungen beträgt nach der Kalibrierung mittels des Aluminium Kalibriermusters $\pm 1,65 \mu\text{m}$ und die maximale Abweichung $\pm 657,2 \mu\text{m}$.

Die Messungen mittels Referenzobjekten ergeben, dass das System insgesamt eine Auflösung von $68 \mu\text{m}$ für den minimalen Arbeitsbereich von 11 cm auf 7,5 cm besitzt. Somit eignet sich das System für alle stationären Vermessungen, die in einer Ebene ablaufen und eine maximale Auflösung von $68 \mu\text{m}$ erfordern.

Abstract

Optical measuring systems are widely used in science and industry. Applications are, for example, the testing of manufacturing tolerances or minimally invasive surgery in the medical sector. Optical measuring systems have several advantages over tactile systems, such as the comparatively high speed or the non-reactive nature of the measurement. The accuracy of optical measuring systems depends on many influencing factors. An important influencing factor is the correct calibration of the system in order to eliminate systematic measurement deviations. A systematic measurement deviation of such systems are the distortions that occur in an optical system.

This thesis deals with the development of an optical measurement system and its calibration. The requirements for the system are a working area of maximum 30 cm by 20 cm and a high flexibility to adapt it to different tasks. For this purpose, first the necessary fundamentals of optical systems are explained and then corresponding hardware is selected. Afterwards selected influences are investigated in more detail. For example, the influence of the images used for calibration is considered. In addition, the choice of material for the calibration pattern, such as aluminum or paper, is examined.

First, the suitability of different systems is compared by means of the factors resulting from the fundamentals. Factors such as sharpness, distortion and chromatic aberration are considered. The focus in this work is particularly on the sharpness of the system, since this is the decisive factor for the achievable resolution. Sharpness is an aspect that is perceived differently by different people. Therefore, it is shown how the sharpness of an optical system can be compared on the basis of measured values. The final chosen hardware consists of a Sony Alpha 7R4 as camera and a Sony 90 mm F2.8 lens.

After that, the system is assembled with the selected hardware. Then software is developed to calibrate the system. The camera calibration according to Zhang is used. After that, the software is implemented, which is used for measurements done with the system. This is realized in this work by a „canny edge detector“. After the completion of the whole system consisting of hardware and software, the mentioned influencing factors on the calibration and the measurement are analyzed.

This shows that a calibration of the system using a calibration pattern made of paper can reduce the reprojection error due to distortions by 76%. Calibration using a calibration pattern made of aluminum reduces the reprojection error by 87%. The average remaining measurement error due to distortion after calibration using the aluminum calibration pattern is $\pm 1.65 \mu\text{m}$ and the maximum error is $\pm 657.2 \mu\text{m}$.

Measurements using reference objects show that the system has an overall resolution of $68 \mu\text{m}$ for the minimum working range of 11 cm by 7.5 cm. Thus, the system is suitable for all stationary measurements that run in one plane and require a maximum resolution of $68 \mu\text{m}$.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. mont. Mario Kupnik für die Gelegenheit bedanken, an diesem spannenden Thema arbeiten zu können.

Ein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Romal Chadda M.Sc. und Claas Hartmann M.Sc., die mir durch regelmäßige Anregungen und konstruktive Kritik zur Seite standen. Die Zusammenarbeit war angenehm und hat mir sehr viel Spaß gemacht.

Ein Dank gilt auch Jan Helge Dörsam, der mich während dieser Arbeit durch seine Kenntnisse im Bereich der optischen Messtechnik stets unterstützt hat.

Ebenfalls bedanke ich mich bei all denjenigen, die mir durch Ratschläge und Anregungen zur Seite standen.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, ohne die meine Arbeit nicht möglich gewesen wäre, sowie für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	9
1.1 Stand der Technik	10
2 Grundlagen Kamerasyteme	12
2.1 Abbildungen	12
2.2 Kamerakalibrierung	15
2.3 Sensor	19
2.3.1 Auflösung	19
2.3.2 Größe	20
2.3.3 Bit-Tiefe und Dynamikbereich	20
2.3.4 Technologie	21
2.3.5 Monochrom/Farblich	23
2.4 Optik	24
2.4.1 Fokus	24
2.4.2 Entozentrische Optiken	25
2.4.3 Telezentrische Optiken	25
2.5 Optische Fehler	26
2.5.1 Chromatische Aberration	26
2.5.2 Koma	27
2.5.3 Sphärische Aberration	27
2.5.4 Astigmatismus	28
2.5.5 Vignettierung	29
2.5.6 Verzerrung	29
2.6 Bewertung Optischer Systeme	30
2.6.1 Die Modulationstransferfunktion	30
2.6.2 Messung der Modulationstransferfunktion	31
2.6.3 Slanted Edge Methode	34
2.7 Beleuchtung	36
2.7.1 Probleme bei unzureichender Beleuchtung	36
2.7.2 Beleuchtungsarten	37
3 Auswahl des Kamerasytems	39
3.1 Kamera	40
3.2 Objektiv	41
4 Messabweichung entlang der Messkette	46
5 Software	49
5.1 Kalibrierung	49

5.2	Messung	52
6	Ergebnisse und Diskussion	56
6.1	Kalibrierung	56
6.2	Messung	60
7	Schlussfolgerung und Ausblick	65
	Abbildungsverzeichnis	66
	Tabellenverzeichnis	69
	Akronyme	70
	Literatur	71

1 Einleitung

Der Bereich der optischen Messtechnik wird immer relevanter und findet in immer mehr Bereichen Verwendung [1]. Optische Messsysteme eignen sich, um Messgrößen wie Position, Kontur, Form, Rauheit, Schichtdicke und verschiedene andere Materialeigenschaften zu bestimmen [2, 3]. Der Vorteil der genauen Überwachung solcher Parameter liegt beispielsweise in geringerer Nachbearbeitung, die dadurch für Bauteile benötigt wird. So werden optische Messsysteme häufig in der Qualitätskontrolle von Karosserie oder Leiterplatten und in der allgemeinen Prozesskontrolle verwendet.

Auch in den Bereichen Prozesssteuerung, Computer Vision sowie in der robotergestützten minimalinvasiven Operation finden optische Messsysteme Verwendung [4]. Für diese und viele weitere Anwendungen werden präzise optische Messsysteme benötigt. Diese wurden erst durch die technischen Fortschritte von Kamerasensoren der letzten Jahre ermöglicht. Dadurch können exakte und wiederholbare Messergebnisse erhalten werden.

Vorteile von optischen- gegenüber taktilen Systemen sind die einfache Automatisierbarkeit der Messung, Verschleißfreiheit und eine hohe Messgeschwindigkeit [3]. Aus diesen Gründen lassen sie sich besonders gut in Produktionsketten einbinden. Zusätzlich ermöglicht die berührungslose Messung, sehr kleine und fragile Strukturen zu vermessen. Des Weiteren bieten optische Messverfahren die Möglichkeit des direkten Vergleichs mit einem CAD Modell, beispielsweise durch Überlagerung [3]. Dadurch ist erkennbar, ob die gewünschte Genauigkeit eines Bauteils eingehalten wurde. Ein weiterer Vorteil der optischen Systeme ist die hohe Flexibilität und die rückwirkungsfreie Bestimmung der Messgrößen [1, 3].

Ziel dieser Arbeit ist es, ein optisches Messsystem zur Positions- und Längenbestimmung in einer Ebene zu entwickeln. Eine Anforderung ist der Arbeitsbereich des Systems von 30 cm auf 20 cm. Dafür gilt es zuerst, geeignete Hardware auszuwählen und anschließend eine Software zur Bedienung zu implementieren.

Der Aufbau eines optischen Messsystems besteht aus drei Hauptkomponenten: der Kamera, der Optik und der Beleuchtung. Es werden Anforderungen für die Komponenten aufgestellt und verschiedene Systeme verglichen.

Als Erstes wird eine Kalibrierung des Systems aufgrund optischer Verzerrungen benötigt [5, 6, 7]. Da Kameras immer häufiger in der Wissenschaft und Industrie für Vermessungszwecke verwendet werden, wird auch eine korrekte Kalibrierung dieser Kameras immer wichtiger [8]. Deshalb ist es notwendig, Einflussfaktoren auf die Qualität dieser Kalibrierung zu untersuchen.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es aus diesem Grund, einige dieser Einflussfaktoren zu analysieren. Danach folgt der Aspekt der eigentlichen Messung und wie diese realisiert werden kann. Auf die Messung existieren ebenfalls Einflussfaktoren, die untersucht werden müssen, wie beispielsweise eine Verschiebung gegen die Messebene. Abschließend wird die Genauigkeit des Systems charakterisiert.

1.1 Stand der Technik

Es existieren verschiedene Arten optischer Messsysteme, die zur Positions- und Längenbestimmung verwendet werden. Drei ausgewählte Arten werden hier beispielhaft darstellt.

Für die Kontrolle von Konturen wird häufig ein Schattenwurfsystem verwendet. Der Messaufbau besteht hierbei aus einer telezentrischen Hintergrundbeleuchtung und einem Charge-Coupled Device (CCD) oder Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) Sensor. Durch den Schattenwurf des Objekts auf den Sensor kann die Größe der Kontur bestimmt werden (Abb. 1.1) [9]. Mit dieser Messmethode ist jedoch ausschließlich das Messen von Konturen möglich. Dadurch ist dieses System nicht flexibel, da es sich beispielsweise nicht zur Oberflächenmessung eignet.

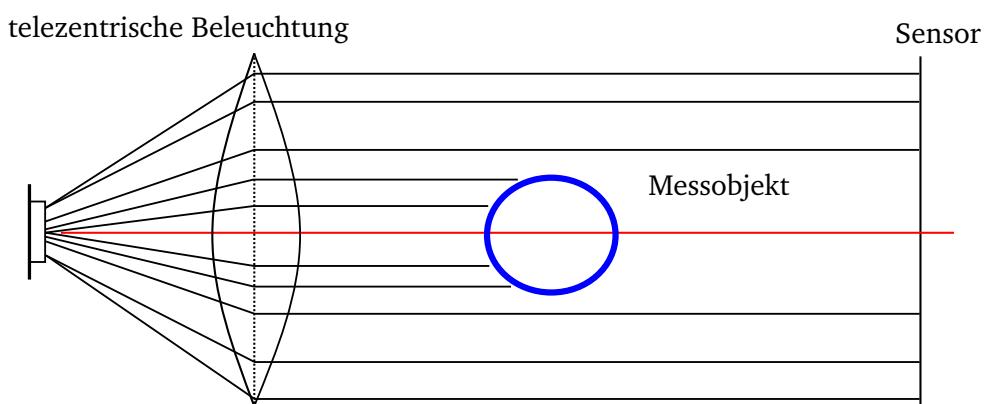


Abbildung 1.1: Das Schattenwurfsystem funktioniert, indem der Schatten eines Objekts durch eine telezentrische Lichtquelle auf einem Sensor beobachtet wird.

Eine weitere optische Messmethode ist die Lasertriangulation. Dabei wird ein Laser auf das zu vermessende Objekt fokussiert und mit einer CCD-Zeile beobachtet. Ändert sich die Entfernung des Objekts zum Sensor (Δh), dann ändert sich auch der Winkel, unter dem der Laserpunkt beobachtet wird und damit die Position seiner Abbildung auf der CCD-Zeile (Δz). Sie zeichnet sich durch eine sehr hohe Genauigkeit, im Vergleich zur vorherigen Methode, aus [10]. Nachteile dieser Methode sind beispielsweise die benötigten Schutzmaßnahmen bei Verwendung von Lasern sowie die hohe Intensität von Laserlicht, wodurch sie nicht für alle Materialarten geeignet ist [10].

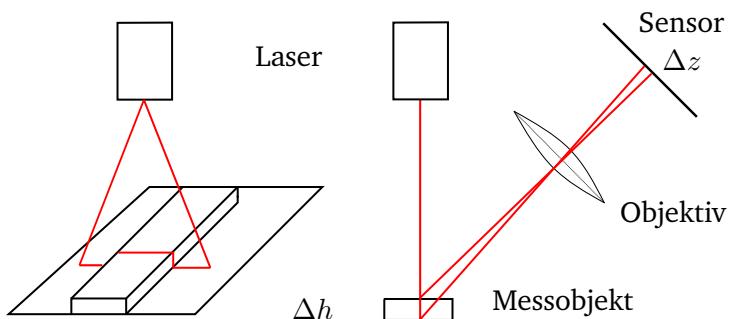


Abbildung 1.2: Die Lasertriangulation funktioniert, indem ein Laser auf das Messobjekt fokussiert und durch einen Sensor beobachtet wird.

Des Weiteren ist es möglich, Konturen in einem Bild eines CCD oder CMOS Sensors mit frontaler Beleuchtung durch Software-Filter zu erkennen (vgl. Abb. 1.3) [11]. Mit einer im Bild enthaltenen Referenz kann somit eine Messung vorgenommen werden. Diese Methode hat den Vorteil, dass sie über einen weniger komplexen Messaufbau verfügt und keine Schutzmaßnahmen getroffen werden müssen. Sie ist auch flexibler als Schattenwurfsysteme, da auch Konturen auf der Vorderseite eines Objekts erkannt werden können. Die Genauigkeit ist jedoch, je nach gewählter Auflösung des Sensors und anderer Faktoren, geringer als die der Lasertriangulation.

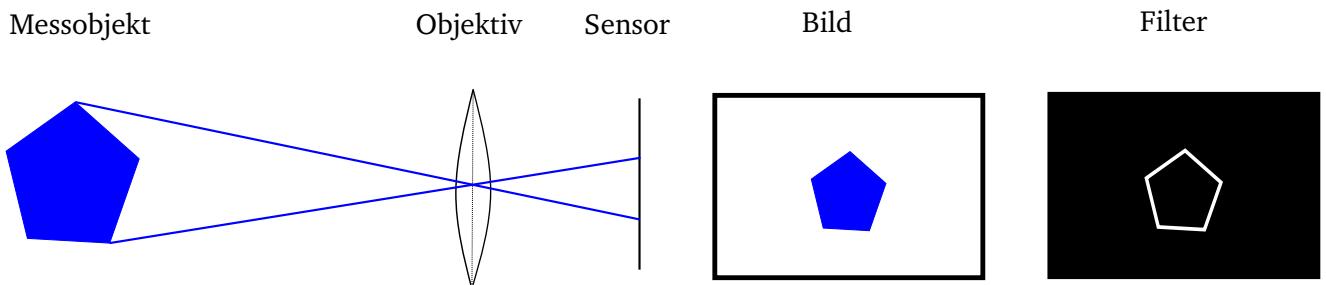


Abbildung 1.3: Bei der Filtermethode wird zuerst ein Bild des Objekts mittels eines CCD- oder CMOS-Sensors erstellt. Dabei befindet sich eine Referenz mit bekannter Größe in der gleichen Ebene wie das Objekt. Anschließend wird ein Softwarefilter mit dem Bild überlagert, um Objektkanten zu erkennen. Die Kanten werden nun mittels der Referenz verglichen und somit vermessen.

Aufgrund der Vorteile der letzten Methode wird in dieser Arbeit ein solches System entwickelt. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, werden solche Systeme bereits verwendet. Dabei sind sie jedoch meistens für eine spezielle Aufgabe, wie das Prüfen von Leiterplatten, ausgelegt und eignen sich nicht als allgemeine Messvorrichtung. Am Fachgebiet wird ein Messsystem benötigt, welches flexibel erweitert und auf individuelle Anwendungen angepasst werden kann. Dies ermöglicht es, unterschiedliche Messaufbauten oder Bauteile auf ihre Genauigkeit zu prüfen. Aus diesen Gründen muss ein solches adaptives Messsystem entwickelt werden.

Ein wichtiger Bestandteil eines optischen Messsystems ist die Kamerakalibrierung. Die Kalibrierung ist ein Aspekt in der Messtechnik, der verwendet wird, um systematische Messabweichungen zu eliminieren. Bei Verzerrungen in einer Optik handelt es sich um eine solche systematische Messabweichung. Die Kamerakalibrierung ist ein Teil in der Computer Vision, zu dem bereits viele Arbeiten existieren [6, 7, 12, 13]. Dabei gibt es bis jetzt wenig Informationen über den Einfluss bestimmter Parameter wie die Materialwahl des Kalibrierobjekts oder die Anzahl der verwendeten Kalibrierbilder. In dieser Arbeit werden deshalb zusätzlich diese Einflüsse auf die Qualität der Kalibrierung untersucht.

2 Grundlagen Kamerasytème

In dem folgendem Kapitel werden erforderliche Grundlagen zu Abbildungen erklärt. Anschließend folgt eine Erklärung, wie der Prozess der Kamerakalibrierung in dieser Arbeit abläuft und wofür er benötigt wird. Danach folgen Kameraeigenschaften und einige optische Effekte, die ein Messsystem beeinflussen können.

2.1 Abbildungen

Eine Kamera erzeugt eine Abbildung von einem dreidimensionalen Objektraum auf einen zweidimensionalen Bildraum. Es handelt sich um eine N:1 Abbildung, in der N Objektpunkte in einen Bildpunkt abgebildet werden. Bei dieser Art der Abbildung tritt ein Informationsverlust auf, nämlich die Information über Abstand und Winkel (Abb. 2.1).

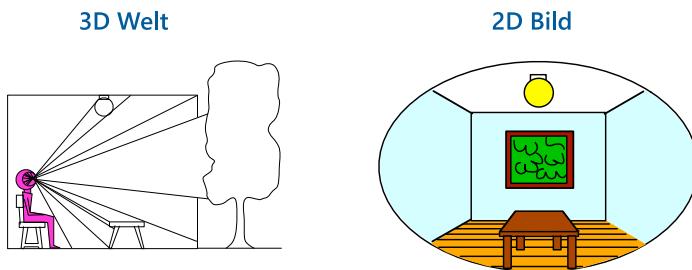


Abbildung 2.1: Bei Abbildungen einer Kamera gehen die Information über Abstand und Winkel verloren [14].

Die Abbildung durchläuft drei Koordinatensysteme (Abb. 2.2). Begonnen wird mit einem Punkt im dreidimensionalen Raum, der in Weltkoordinaten (X_W) angegeben wird. Danach folgt die Kamera mit ebenfalls noch dreidimensionalen Kamerakoordinaten (X_C), die von der Translation und Rotation der Kamera relativ zu den Weltkoordinaten bestimmt werden. Diese werden überführt in einen Punkt in zweidimensionalen Bildkoordinaten (X_I) [14].

Um diese Abbildung zu charakterisieren, wird nun ein Modell einer Kamera benötigt. Ein einfaches Modell ist eine Lochkamera, die nur aus einer Blende und der Bildebene besteht. In einer Lochkamera werden Weltpunkte durch eine Zentralprojektion auf Bildpunkte abgebildet. Dabei liegt das optische Zentrum im Ursprung des Kamerakoordinatensystems und die Bildebene senkrecht zur z-Achse. Der Abstand zwischen Bildebene und optischem Zentrum wird Brennweite f genannt.

Punkte in diesen Koordinatensystemen werden mit $X_C = (x_C, y_C, z_C)$ bezeichnet [5, 14].

Aufgrund des Strahlensatzes ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\frac{x_i}{x_C} = \frac{y_i}{y_C} = \frac{f}{z_C}. \quad (2.1)$$

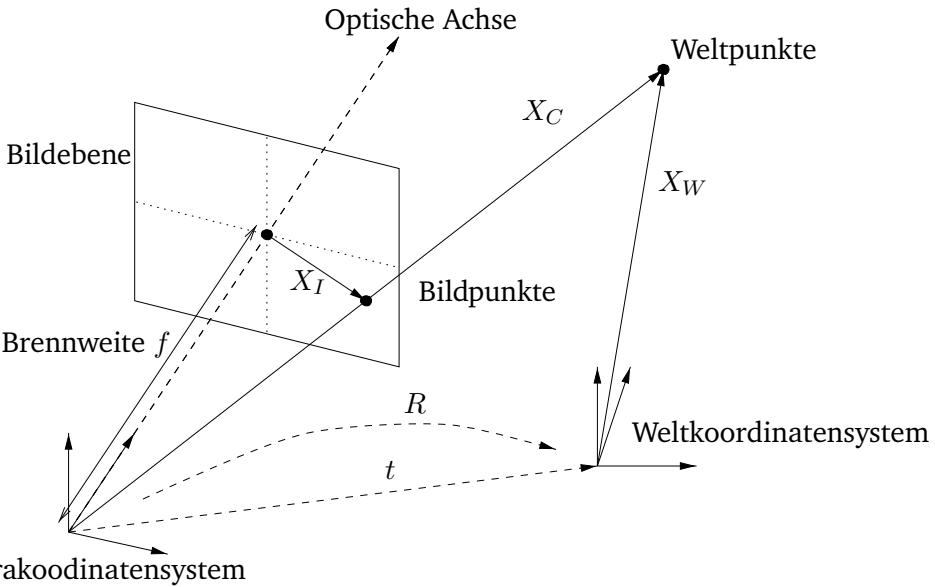


Abbildung 2.2: Die Abbildung mittels des Lochkameramodells durchläuft 3 Koordinatensysteme: Weltkoordinaten, Kamerakoordinaten und Bildkoordinaten [5].

Somit ergibt sich folgende Abbildung:

$$(x_C, y_C, z_C) \Rightarrow \left(\frac{f}{z_C} x_C, \frac{f}{z_C} y_C \right). \quad (2.2)$$

Dabei handelt es sich um eine nichtlineare Transformation. Da mit linearen Modellen einfacher zu handhaben ist, wird die Transformation durch Umwandlung in homogene Koordinaten in eine lineare Form gebracht. Dies funktioniert durch das Hinzufügen einer weiteren Koordinate:

$$(x_C, y_C, z_C) \Rightarrow (x_C, y_C, z_C, 1) ; (x_i, y_i) \Rightarrow (x_i, y_i, 1). \quad (2.3)$$

Danach lässt sich folgende lineare Projektionsmatrix P bilden:

$$\begin{pmatrix} fx_C \\ fy_C \\ z_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{pmatrix} \Leftrightarrow X_I = P \cdot X_C. \quad (2.4)$$

P ist das Produkt einer Diagonalmatrix K und der Einheitsprojektionsmatrix P_p welche $[I|0]$ entspricht:

$$\begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow P = K \cdot P_p. \quad (2.5)$$

Nun wird beachtet, dass ein Kamerasensor seinen Koordinatenursprung nicht in die Mitte, sondern an eine Ecke legt und die Einheit nicht in Länge, sondern in Pixel angegeben ist. Also muss noch eine Verschiebung sowie eine Umrechnung von Längen in Pixel erfolgen. Die Verschiebung wird an der entsprechenden Stelle durch x_0 und y_0 in der Matrix hinzugefügt (Gleichung (2.6)). Bei der Umrechnung von Längen in Pixel muss beachtet werden, dass der Skalierungsfaktor in vertikaler und horizontaler Richtung unterschiedlich sein kann,

wenn die Pixel nicht quadratisch sind. Bei einer Pixeldichte des Sensors von $m_x \times m_y$ [Pixel/Sensorgröße] ergeben sich $f_x = m_x \times f$ [Pixel] und $f_y = m_y \times f$ [Pixel]. Damit ergibt sich folgende Matrix:

$$K = \begin{pmatrix} f_x & 0 & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Zusätzlich wird modelliert, dass die optische Achse nicht ideal senkrecht auf der Bildebene steht, was dafür sorgt, dass Winkel verzerrt werden. Dies passiert durch einen sog. Scherungsparameter s :

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Somit lassen sich die Kamerakoordinaten in die Bildkoordinaten transformieren:

$$X_I = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & s & x_0 & 0 \\ 0 & f_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

$$X_I = K \cdot [I|0] \cdot X_C. \quad (2.9)$$

Die Parameter, die in K enthalten sind, werden auch interne Kameraparameter genannt. Nun muss noch die Transformation von Weltkoordinaten in Kamerakoordinaten modelliert werden. Die Kamera kann gegenüber den Weltkoordinaten verschoben und gedreht sein. Also werden eine Rotationsmatrix R und ein Translationsvektor t für diese Transformation benötigt. Diese Eigenschaften werden als externe Kameraparameter bezeichnet.

$$X_C = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot X_W. \quad (2.10)$$

Nach einsetzen von Gleichung (2.10) in Gleichung (2.9) ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

$$X_I = K[I|0] \cdot X_C = K \cdot [R|t] \cdot X_W. \quad (2.12)$$

Insgesamt ergeben sich 11 Freiheitsgrade, drei rotatorische, drei translatorische sowie f_x , f_y , x_0 , y_0 und s . Der Vorgang des Sammelns dieser Parameter wird als *Kamerakalibrierung* bezeichnet, welche es ermöglicht, eine dreidimensionale Interpretation von Bildern erhalten zu können.

2.2 Kamerakalibrierung

Da Verzerrungen eines Objektives zur Kategorie der systematischen Messabweichungen gehören, ist es möglich, diese durch den Prozess einer Kalibrierung zu beheben. Nach DIN 1319 („Grundlagen der Messtechnik“) ist der Begriff Kalibrieren definiert als [15]:

„Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen. Bei der Kalibrierung erfolgt kein Eingriff, der das Messgerät verändert“.

Zusätzlich gehört, nach DIN 1319, zu einer Kalibrierung unter anderem:

- Die Definition des Messprozesses;
- Die Erstellung eines mathematischen Modells zur Auswertung der Kalibrierung;
- Eine Unsicherheitsanalyse des Modells;
- Die Angabe des vollständigen Ergebnisses d.h. Kalibrierwert und Unsicherheit;
- Die Kalibrierwerte werden zur Messkorrektur verwendet.

Bei dem mathematischen Modell handelt es sich um das im vorherigen Abschnitt erläuterten Kameramodell. Es existieren auch andere Modelle, auf welche später noch eingegangen wird. Eine Kamerakalibrierung muss vorgenommen werden, um Verzerrungen durch die Optik zu beheben sowie den Zusammenhang zwischen den Weltkoordinaten und den Kamerakoordinaten zu bestimmen. Das Ziel nach der Kalibrierung ist es, unverzerzte Aussagen über die Szene im euklidischen Raum treffen zu können.

Dafür werden die internen- und externen Kameraparameter benötigt. Grundsätzlich gibt es zwei Ansätze. Zum einen eine *Photogrammetry Kalibrierung* mittels eines Kalibrierobjekts und zum andern die *Selbstkalibrierung*. Bei der *Photogrammetry* wird ein Objekt benötigt, an dem n Punkte mit bekannten 3D Koordinaten vorhanden sind. Dabei kann es sich um ein 2D oder 3D Kalibrierungsobjekt handeln. Bei 2D Objekten wird häufig ein schwarz-weiß Schachbrett Muster verwendet, da sich die Ecken gut detektieren lassen (Abb. 2.3).

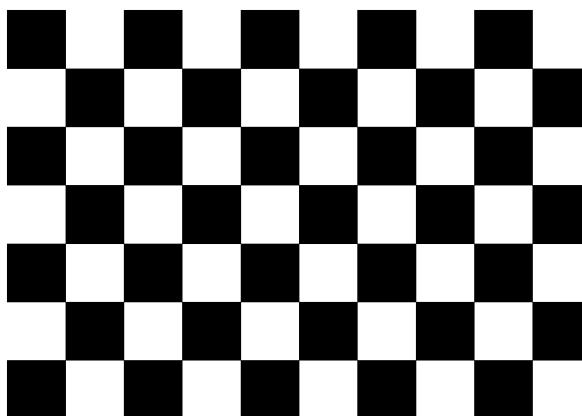


Abbildung 2.3: Zu sehen ist ein 6x9 Schachbrett Kalibrierungsmuster. 6x9, da die inneren Eckpunkte der Quadrate zur Kalibrierung genutzt werden. Solche Strukturen können einfach durch Kantenerkennungsfilter detektiert werden [16].

Dabei muss darauf geachtet werden, dass das Kalibriermuster möglichst genau in einer Ebene liegt und eine hohe Genauigkeit der Abstände besitzt, da sonst das Ergebnis systematische Fehler enthält. Optimalerweise wird eine feste Metall- oder Glasplatte verwendet, um Verbiegungen zu vermeiden und bessere Fertigungstoleranzen zu erreichen als auf Papier.

Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass das Kalibrierobjekt möglichst viel vom Bildbereich abdeckt, da Verzerrungen zum Rand meist ausgeprägter sind. Von diesem Objekt werden nun mindestens sechs Punkt-Korrespondenzen von Weltkoordinaten und Bildkoordinaten benötigt, um die minimale Lösung zu erhalten. Diese dürfen jedoch nicht in einer Ebene liegen, da das sich ergebende Gleichungssystem in diesem Fall unterbestimmt ist. Also werden bei einem 2D Kalibrierobjekt mindestens zwei Bilder aus verschiedenen Winkeln benötigt [14]. Mit mehr Korrespondenzen lässt sich die Lösung mittels des Levenberg-Marquardt Algorithmus verbessern, welcher die Lösung mit der Methode der kleinsten Quadrate optimiert [7, 14].

Die am häufigsten verwendete Methode zur Kalibrierung ist die von Zhengyou Zhang [6], welche auch von Open-Source Bibliotheken wie OpenCV verwendet wird. Diese benötigt keine absolute Position von Weltkoordinaten, sondern nur die relative Position auf einem Schachbrett Muster. Dafür wird für jedes Bild ein neues Koordinatensystem gebildet, sodass das Schachbrett Muster in der x-y-Ebene liegt. Dies hat zur Folge, dass die z-Koordinate immer 0 ist und somit die dritte Spalte der Rotationsmatrix aus Gleichung (2.11) entfällt:

$$X_I = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_W \\ y_W \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.13)$$

Für jede Punkt-Korrespondenz ergibt sich nun ein solches Gleichungssystem, welches nach Zhangs Methode mittels einem ähnlichen Verfahren wie der direkten linearen Transformation (DLT) gelöst werden kann [5].

$$X_I = P \cdot X_W. \quad (2.14)$$

Dafür wird zuerst die Projektionsmatrix P aufgeteilt:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1^T \\ P_2^T \\ P_3^T \end{pmatrix} \cdot X_W. \quad (2.15)$$

Pro Korrespondenz ergeben sich zwei Gleichungen:

$$x_i = \frac{P_1^T \cdot X_W}{P_3^T \cdot X_W} \quad \text{und} \quad y_i = \frac{P_2^T \cdot X_W}{P_3^T \cdot X_W}. \quad (2.16)$$

Stehen nun über sechs Korrespondenzen zur Verfügung, ergeben sich zwölf Gleichungen, die ausreichen, um die elf Kamera Parameter zu bestimmen. Da in Zhangs Methode jedoch $z = 0$ gesetzt wird, bleiben nur acht Freiheitsgrade übrig, weshalb nur vier Korrespondenzen pro Bild benötigt werden. Dafür werden mindestens zwei Bilder aus zwei verschiedenen Winkeln benötigt, um alle Parameter bestimmen zu können [6]. Anschließend lassen sich die Gleichungen in ein Gleichungssystem umformen:

$$\begin{pmatrix} -X_W^T & 0^T & x_i \cdot X_W^T \\ 0^T & -X_W^T & y_i \cdot X_W^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = 0 \Leftrightarrow A \cdot p = 0. \quad (2.17)$$

A ist nun eine 2×9 Matrix und p ein 1×9 Lösungsvektor, welcher aus den neun Einträgen der Projektionsmatrix P besteht. Wenn nun n Korrespondenzen vorhanden sind, können n dieser Gleichungssysteme übereinander

gestapelt werden, was A zu einer $2nx9$ Matrix macht. Für vier Korrespondenzen ergibt sich ein System der Größe $8x9 \cdot 9x1$, was die minimale Lösung ergibt. Bei realen Messungen besitzt das System $A \cdot p = 0$ jedoch keine nicht-triviale Lösung. Deshalb wird ein Minimierungsproblem verwendet, dass den Fehler $\| A \cdot p \|$ minimiert [5].

Anschließend werden die Werte des Lösungsvektors p in die Projektionsmatrix P eingesetzt. Aus der Projektionsmatrix P können anschließend K , R und t bestimmt werden. Nach dieser analytischen Lösung kann das Ergebnis mit weiteren Korrespondenzen, mittels eines nichtlinearen Minimierungsproblems, verbessert werden [6].

Bei der *Selbstkalibrierung* werden keine Information über, schon bekannte, 3D Punkte benötigt, jedoch ist durch das Fehlen dieser Informationen die Genauigkeit der Selbstkalibrierung geringer. Deshalb sollte für Positions- und Längenbestimmungen, wenn möglich, keine Selbstkalibrierung verwendet werden.

Bei einer Transformation innerhalb des euklidischen Raumes gilt, dass Längen und Kreuzprodukte und somit auch Winkel erhalten bleiben. Jedoch gehen diese Informationen bei einer Abbildung mittels einer Kamera verloren (vgl. Abschnitt 2.1). Die am häufigsten durch die Optik auftretenden Verzerrungen sind radialer und tangentialer Art. Dies bewirkt, dass ursprünglich gerade Linien nicht mehr gerade und parallele Linien nicht mehr parallel erscheinen.

Radiale Verzerrungen entstehen durch die Linsenform, da das Licht am Rand der Linse stärker gebrochen wird als in der Mitte. Tangentiale Verzerrungen werden häufig durch kleine Ungenauigkeiten in der Konstruktion verursacht [13]. Radiale Verzerrungen können in verschiedenen Arten, wie „Barrel distortion“ oder „Pincushion distortion“, auftreten (Abb. 2.4).



Abbildung 2.4: (a) Unverzerrt; (b) Barrel distortion; (c) Pincushion distortion [16].

Ein häufig verwendetes Modell, um Verzerrungen zu beheben, ist das „Brown-Conrady Distortion Model“[17, 18]. Nach diesem Ansatz können die radialen Verzerrungen folgendermaßen modelliert werden:

$$x_u = x_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (2.18)$$

$$y_u = y_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6), \quad (2.19)$$

wobei (x_u, y_u) die unverzerrten Punkte; (x_d, y_d) die verzerrten Punkte; k_1, k_2, k_3 radiale Verzerrungskoeffizienten und r der Radius zur optischen Achse sind.

Tangential Verzerrungen werden modelliert durch:

$$x_u = x_d + (2p_1x_dy_d + p2(r^2 + 2x_d^2)) \quad (2.20)$$

$$y_u = y_d + (p1(r^2 + 2y_d^2) + 2p2x_dy_d), \quad (2.21)$$

wobei (x_u, y_u) die unverzerrten Punkte; (x_d, y_d) die verzerrten Punkte; p_1 und p_2 - tangentiale Verzerrungskoeffizienten und r der Radius zur optischen Achse sind.

Diese Koeffizienten werden häufig in einem Vektor D zusammengefasst:

$$D = (k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3). \quad (2.22)$$

Die Verzerrungsparameter zählen ebenfalls zu den internen Kameraparametern, die beim Pinhole Modell noch nicht beachtet wurden. Bei diesem Modell handelt es sich, wie bei allen Modellen, nur um eine Näherung der Verzerrungen in einer Optik. Es gibt auch präzisere generische Modelle mit über 10.000 Kameraparametern, bei denen viel mehr Testbilder benötigt werden, um alle Parameter zu berechnen (100-3000) [12]. Dabei funktioniert das generische Modell nicht nach einer physikalischen Interpretation der Kamera Geometrie, sondern durch Modellierung einzelner Strahlen verteilt über die Sensorfläche. Im Grenzfall würde jedes Pixel des Sensors durch einen solchen Strahl modelliert werden. In der Praxis reicht es jedoch aus, einzelne Bereiche durch einen Strahl zu modellieren und die Zwischenräume durch Interpolation zu berechnen. Dadurch wird der mögliche systematische Fehler durch eine Annahme von ausschließlich radialer und tangentialer Verzerrung umgangen [12].

Für die nach DIN 1319 empfohlene Unsicherheitsanalyse gibt es mehrere Aspekte, die beachtet werden müssen. Zum einen die Unsicherheit der, um die Verzerrung korrigierten, Eckpunkte und zum anderen die Unsicherheit der ermittelten Parameter.

Die Unsicherheit der korrigierten Eckpunkte lassen sich über den sog. „Reprojection Error“ beurteilen und die Unsicherheit der Parameter mit dem „Estimation Error“ [19]. Der Reprojection Error gibt an, wie genau ein mittels der Kameraparameter projizierter Punkt $x_{project}$ an einem real gemessenen Punkt X_W landet, wenn Gleichung (2.14) verwendet wird. Er ist definiert als die euklidische Distanz zwischen diesen Punkten. Anschließend wird der Mittelwert über alle Korrespondenzen genommen [20]:

$$\frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^N d(x_{project,n}, X_{W,n}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^N \left\| (x_{project,n} - X_{W,n}) \right\| \quad (2.23)$$

Der Estimation Error kann durch n -malige Kalibrierung nach GUM Typ A abgeschätzt werden. Er gibt ein Konfidenzintervall für die berechneten Parameter an:

$$u_A(x) = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s(x). \quad (2.24)$$

Hierbei ist $s(x)$ die Standardabweichung des entsprechenden Parameters und der Vorfaktor t kann je nach gewünschtem Konfidenzintervall und Anzahl der Kalibrierungen der t-Verteilung entnommen werden.

Der nächste Punkt nach DIN1319 ist die Angabe des vollständigen Messergebnisses inklusive der Unsicherheit (Abb. 2.5).

```
Intrinsics
-----
Focal length (pixels): [ 535.9158 +/- 0.0000      535.9158 +/- 1.2919      ]
Principal Point (pixels): [ 342.2831 +/- 1.3643      235.5708 +/- 1.4770      ]
Radial distortion:      [ -0.2664 +/- 0.0163      -0.0386 +/- 0.1271      0.2384 +/- 0.2763      ]
Tangential distortion:  [ 0.0018 +/- 0.0003      -0.0003 +/- 0.0004      ]
```

Abbildung 2.5: Beispielhafte Messergebnisse der Kameraparameter, bestehend aus Mittelwert und Konfidenzintervall [19].

2.3 Sensor

Der Sensor ist die zentrale Einheit einer Kamera. Er erhält Informationen in optischer Form und wandelt diese in eine elektrische Form um, damit anschließend ein Prozessor ein digitales Bild erzeugen kann. Auflösung, Qualität, Lichtempfindlichkeit und Energieverbrauch moderner optischer Sensoren haben sich in den letzten Jahren immer weiter gesteigert [21]. Dies ist unter anderem aufgrund von besseren Verfahren in der Halbleitertechnik möglich. Es gibt viele Eigenschaften eines Sensors, die zu beachten sind. Darunter fallen unter anderem seine Auflösung, Größe, Bit-Tiefe, Technologie sowie die Wahl zwischen Monochrom- oder Farbsensoren.

2.3.1 Auflösung

Die Auflösung eines Sensors ist die Anzahl an Pixeln, die auf ihm vorhanden sind. Je höher die Auflösung, desto mehr Details sind erkennbar und desto besser werden auch kleine Details für präzise Messungen erkannt. Es muss darauf geachtet werden, dass die Optik ebenfalls ein Auflösevermögen besitzt, welches hoch genug ist, um die Auflösung des Sensors komplett auszunutzen.

Hohe Auflösungen haben aber auch Nachteile. Je mehr Pixel auf dem Sensor sind, desto länger dauert es, um diesen komplett auszulesen. Aus diesem Grund sind bei höheren Auflösungen meist nur weniger Frames per Second (FPS) möglich. Ebenfalls fallen mehr Daten an, für die entsprechend schnelle Speichermedien und Schnittstellen benötigt werden. Um die Auflösung eines Messsystems zu bestimmen, muss beachtet werden, dass bei Kamerasensoren wie bei allen Sensoren eine diskrete Abtastung der kontinuierlichen Realität stattfindet (Abb. 2.6).

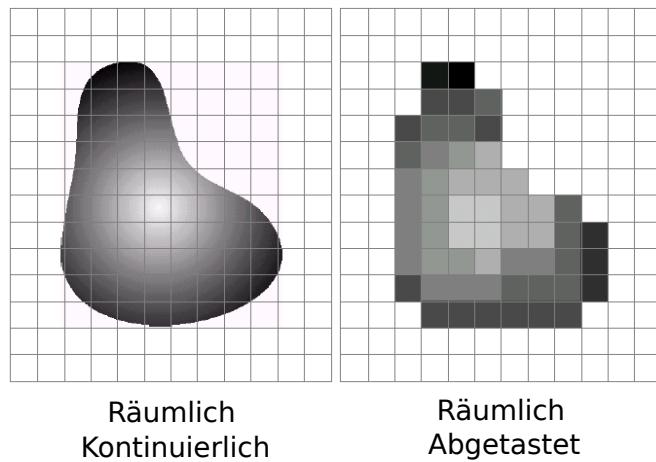


Abbildung 2.6: Bei allen digitalen Sensoren findet eine diskrete Abtastung der kontinuierlichen Realität statt. In diesem Fall jedoch nicht wie z. B. bei elektrischen Signalen in Zeit-, sondern in Raumrichtung [14].

Dabei wird die maximal mögliche Auflösung (Grenzaufösung) durch das Nyquist-Shannon Abtasttheorem beschränkt (Gleichung 2.25) [22].

$$\Delta A_{grenz} = \frac{1}{2} * K_e * f_{sampling} [\text{Pixel/mm}] \quad (2.25)$$

Nach Nyquist ist die maximal mögliche Auflösung ΔA_{grenz} höchstens so groß wie die halbe Abtastfrequenz $f_{sampling}$, welche bei der räumlichen Abtastung des Sensors in Pixel/mm gemessen wird. Wenn das Theorem nicht eingehalten wird, kommt es zu Aliasing und Spiegelfrequenzen, was eine korrekte Rekonstruktion verhindert. Es gibt jedoch Ausnahmen, wobei durch Subpixeling Verfahren diese Grenzauflösung überschritten werden kann. Zusätzlich wird noch ein Faktor zum Kompensieren der Abstände zwischen den einzelnen Pixel hinzugefügt, der sog. Kell Faktor K_e der zwischen 0,5 und 1 liegen kann. Er kann experimentell bestimmt werden und liegt üblicherweise bei ca. 0,7, wodurch eine Unterabtastung modelliert wird [23].

2.3.2 Größe

Je größer der Sensor ist, desto mehr Information in Form von Licht kann er aufnehmen. Je mehr Information zur Verfügung steht, desto geringer ist die minimal bleibende Messabweichung. Außerdem bedeutet ein großer Sensor, bei gleichbleibender Auflösung, ebenfalls große Pixel. Größere Pixel rauschen in der Regel weniger, was mit deren größerer Full Well Capacity zusammenhängt. Diese beschreibt, wie viele Elektronen ein Pixel Element aufnehmen kann, bevor es in Sättigung gerät (Abb. 2.7). So kann ein Pixel mit 5,5 µm Strukturgröße rund 20.000 Elektronen und ein 7,4 µm großes Pixel 40.000 Elektronen akkumulieren [24]. Je höher diese Full Well Capacity, desto höher die Sättigungskapazität und desto besser das Erreichbare Signal to Noise Ratio (SNR). Bei diesen Pixelstrukturen existiert ein Noise Floor, das sog. Dunkelrauschen, welcher durch thermische Effekte präsent ist [25].

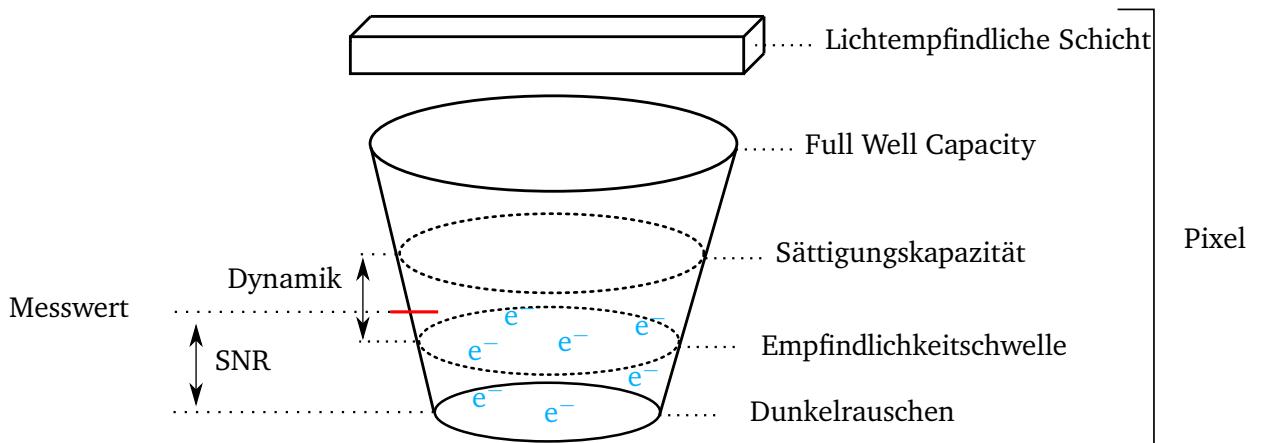


Abbildung 2.7: Die Full Well Capacity beschränkt die Sättigungsgrenze eines Pixels. Das SNR ist die Differenz zwischen dem Messwert und dem Dunkelrauschen in dB [24].

2.3.3 Bit-Tiefe und Dynamikbereich

Die Bit-Tiefe gibt an, wie viele Graustufen eine Kamera erkennen kann, also wie viele Digitalisierungsstufen es gibt (Abb. 2.8). Bei Analogkameras ist das gemessene Signal eine kontinuierliche Spannung abhängig vom Lichteinfall. Diese ist jedoch am unteren Ende durch ein Grundrauschen und am oberen Ende durch eine Sättigung beschränkt. Um ein digitales Bild zu erhalten, muss dieser Wert durch einen Analog Digital Converter (ADC) digitalisiert werden. Je nach Mindestkontrast des Sensors sind Bit-Tiefen von 8-14 Bit üblich [26]. Höhere Bit-Tiefen gehen genau wie höhere Auflösungen mit höherer Datenmenge und geringerer Bildrate einher.

Der Dynamikbereich bezeichnet die Differenz zwischen dem geringstern detektierbaren Signal und dem höchsten detektierbaren Signal und wird in dB angegeben. Er ist begrenzt durch die Sättigungskapazität und der Empfindlichkeitschwelle der Pixel. Je größer der Dynamikbereich, desto größer sollte auch die Bit-Tiefe gewählt werden, um die ganze Skala sinnvoll zu digitalisieren.



Abbildung 2.8: Je höher die Bit-Tiefe, desto genauer werden Helligkeitsunterschiede abgebildet. Die anfallende Datenmenge steigt jedoch ebenfalls [26].

2.3.4 Technologie

Bei optischen Sensoren besteht die Wahl zwischen verschiedenen Technologien. Die gängigsten sind CCD und CMOS. Beide sind Quantendetektoren, welche siliziumbasiert sind, wodurch sie die gleiche spektrale Empfindlichkeit von etwa 300 nm - 1000 nm besitzen. Ebenfalls nutzen beide den inneren photoelektrischen Effekt, um Licht in Ladung umzuwandeln.

Die Elektronen in einem Siliziumkristall befinden sich auf diskreten Energiebändern. Die meisten Elektronen befinden sich anfangs im Valenzband. Durch Anregung können sie in das energetisch höher gelegene Leitungsband gehoben werden. Dafür muss die Energie des anregenden Lichts jedoch größer sein als die Bandlücke E_{gap} , welche im Fall von Silizium 1,12 eV beträgt [27]. Die Energie des Lichts ist proportional zur Frequenz f .

$$h \cdot f \geq E_{gap} \quad (2.26)$$

Diese Anregung kann durch eintreffendes Licht, aber auch durch Wärme ausgelöst werden, was das Dunkelrauschen zufolge hat [25]. Beide Technologien benötigen zusätzlich zu den Fotodioden Bauteile zum Informationstransport oder Umwandlung, weshalb sie einen Füllfaktor [Lichteffektive Fläche/Gesamtfläche] besitzen.

Die Unterschiede beginnen bei der Umwandlung von Ladung in Spannung. Bei CCD Sensoren wird die Ladung aus den einzelnen Pixeln zuerst über Schieberegister, zeilen- und spaltenweise nach außen transportiert. Dies funktioniert, indem die Elektronen durch Anlegen von passenden Spannungen verschoben werden (Abb. 2.9). Anschließend wird durch die Elektronen seriell eine Spannung in einem Kondensator erzeugt und diese je nach gewählter Sensorempfindlichkeit nach der International Organization for Standardization (ISO) verstärkt. Diese wird anschließend durch einen ADC digitalisiert und durch einen Prozessor zu einem Bild zusammengefügt. Der Nachteil von CCD Sensoren liegt in der begrenzten Auslesegeschwindigkeit des seriellen Datenstroms. Dies kann durch Verwendung mehrerer ADCs verbessert werden, wobei dadurch wieder der

Vorteil der Homogenität teilweise verloren geht.

Bei CMOS Sensoren findet diese A/D-Wandlung in jedem einzelnen Pixel parallel statt. Diese Wandlung funktioniert dadurch, dass jeder Fotodiode ein Kondensator parallel geschaltet ist, der durch den Fotostrom geladen wird und eine der Ladung proportionale Spannung erzeugt (Abb. 2.10).

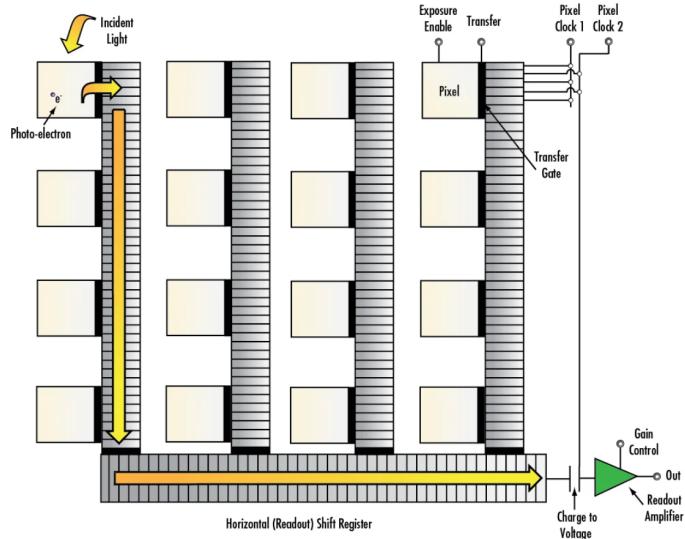


Abbildung 2.9: Aufbau eines CCD Sensors [28]. Die AD-Wandlung findet Seriell durch einen gemeinsamen ADC statt.

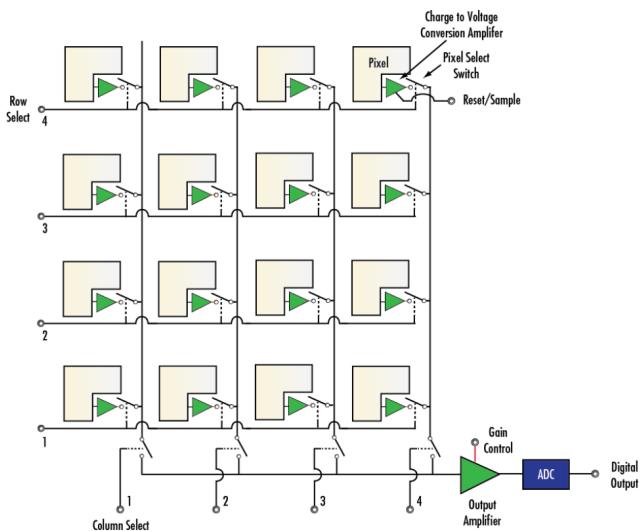


Abbildung 2.10: Aufbau eines CMOS Sensors [28]. Die AD-Wandlung findet parallel in jedem einzelnen Pixel statt.

Da bei CMOS Sensoren die Wandlung parallel passiert, sind deutlich höhere Bandbreiten und eine individuelle Auslesen einzelner Pixel möglich [28]. Ein weiterer Vorteil von CMOS Sensoren ist, dass sie aus verschiedenen Gründen weniger rauschen als CCD Sensoren. Zum einen erzeugen sie weniger Verlustleistung und somit weniger Dunkelrauschen [25]. Zum anderen gibt es aufgrund der frühen Wandlung des Signals innerhalb des

Sensors weniger Strecke, auf dem Störungen auftreten können. Der Nachteil dieser parallelen Wandlung ist, dass die Homogenität der Pixel durch Schaltungsunterschiede der Transistoren reduziert wird. Dadurch steigt das sog. Ortsrauschen (Fixed Pattern Noise) [29].

2.3.5 Monochrom/Farblich

Des Weiteren gibt es noch die Unterscheidung zwischen monochromen und farblichen Sensoren. Für viele Anwendungsfälle in der optischen Vermessung ist ein monochromes Bild ausreichend, um den zu detektierenden Aspekt zu erkennen. Schwierigkeiten können jedoch auftreten, wenn Bereiche mit ähnlicher Helligkeit, aber anderer Farbe, wie zum Beispiel Hellblau und Hellgrün, unterschieden werden müssen [30].

Bei einem Farbsensor handelt es sich praktisch auch um einen Monochromsensor, dessen Pixel mit verschiedenen Farbfiltern versehen sind. Dabei werden die 3 Grundfarben Rot, Grün und Blau verwendet, um anschließend je nach Intensität der Grundfarben alle Farben des sichtbaren Spektrums zu rekonstruieren. Diese RGB Subpixelmatrizen können in verschiedenen Subpixelmustern angeordnet werden. Am häufigsten wird das sog. „Bayer Pattern“ verwendet (Abb. 2.11). Dabei sind $\frac{1}{4}$ der Pixel Rot, $\frac{1}{4}$ Blau und $\frac{2}{4}$ Grün [30]. Grün wird hierbei übergewichtet, da das menschliche Auge ebenfalls stark Grün orientiert ist [31]. Anschließend werden aus diesen Informationen die RGB-Werte für jedes Pixel interpoliert.

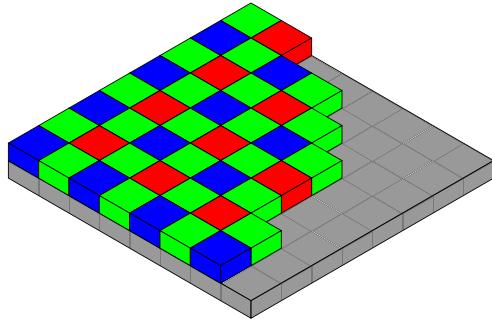


Abbildung 2.11: In grau der monochromer Sensor und darüber das RGB-Bayer-Pattern, welches aus roten, grünen und blauen Farbfiltern besteht. Der grüne Anteil ist dabei doppelt so hoch gewichtet wie der blaue und rote Anteil [32].

Dadurch geht jedoch Detailauflösung verloren und es entstehen aufgrund der Interpolation Fehlinformationen an Kanten, was für Vermessungen ungünstig sein kann. Ein Beispiel für solche Fehlinformationen an Kanten in einem Bild ist, dass an einer harten Kante zwischen zwei Farben. Durch die Bayer-Interpolation wird die Farbe der mittleren Pixel dem Mittelwert der beiden äußeren Farben entsprechen. Durch die Interpolation gehen etwa 30% an maximaler Auflösung verloren. Zusätzlich reduziert sich durch die Farbfilter vor den Pixeln die Lichtempfindlichkeit bis zu 75% [30]. Dieser Reduktion kann jedoch mit stärkerer Beleuchtung entgegengewirkt werden.

2.4 Optik

Die Optik ist der Teil des Systems, der die Abbildung erzeugt, die in 2.1 beschrieben wird. Jedoch wird das Modell der einfachen Lochkamera durch komplexere Objektive erweitert. Das ideale Objektiv würde eine exakte Abbildung der Realität bis ins kleinste Detail erzeugen können. Jedoch weist jede Optik je nach Qualität und Bauart verschiedene optische Fehler auf und verfügt auch über eine maximale „optische Auflösung“. Aber nicht nur mechanische Ungenauigkeit, sondern auch die natürliche Wellenform des Lichtes selbst sorgt durch seine Eigenschaften für Ungenauigkeiten [33]. In optischen Systemen wird meistens die paraxiale Optik, oder gaußsche Optik, als Modell verwendet. In diesem Modell wird das Licht vereinfacht als Strahl angenommen und auch nur die Strahlen betrachtet, die kleine Winkel mit der optischen Achse bilden.

Da Licht in der Realität aber auch über Eigenschaften einer Welle verfügt, können ebenfalls Effekte wie die Beugung und Interferenz auftreten. Die Information, die den Sensor nach der Optik erreicht, ist also bereits eine verfälschte Abbildung der Realität. Es ist möglich, einige dieser Fehler wie die Verzerrungen durch den Prozess der Kameraerakalibrierung teilweise zu entfernen [13, 34].

Optiken oder Objektive funktionieren durch eine Hintereinanderschaltung mehrerer Linsen um eine möglichst realitätsnahe Abbildung zu erhalten. Es wird unterschieden zwischen entozentrischen und telezentrischen Objektiven, auf welche in diesem Kapitel eingegangen wird.

2.4.1 Fokus

Damit ein scharfes Bild auf dem Sensor entsteht, werden Linsen benötigt, um das Licht in einem Punkt auf dem Sensor zu fokussieren (Abb. 2.12). Dafür muss der Abstand zwischen dem optischen Zentrum und dem Sensor (b), abhängig vom Abstand des Motivs (g) verändert werden. Ein kleiner Bereich um den optimalen Fokuspunkt wird als Schärfentiefe oder Depth of Field (DOF) bezeichnet.

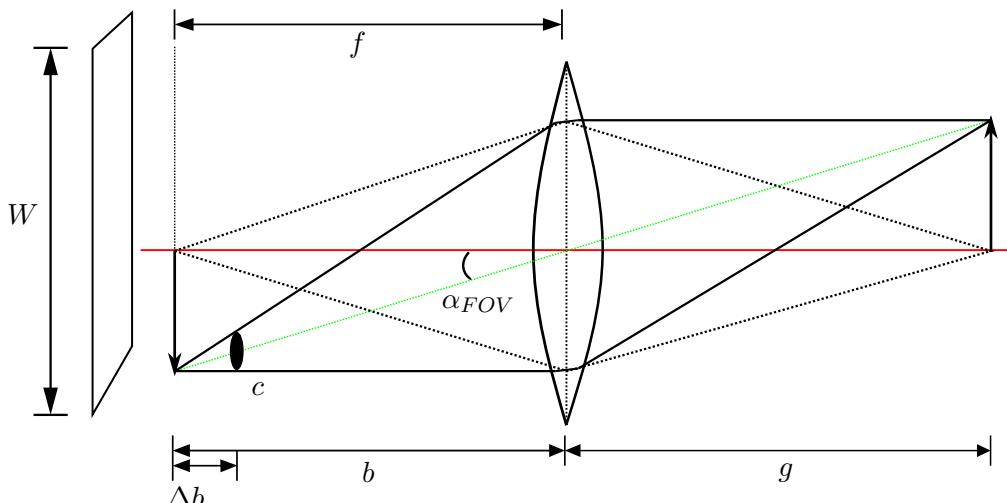


Abbildung 2.12: Ziel ist es, einen Punkt innerhalb des Field of View (FOV) auf den Sensor mit Größe (W) zu lenken und zu fokussieren. Je nach Entfernung zum Objekt g muss die Entfernung zwischen Linse und Sensor(b) angepasst werden (Δb), damit die Strahlen in einem Punkt konvergieren. Der Bereich um den exakten Fokuspunkt, der immer noch ausreichend scharf für die Anwendung ist, wird als Schärfentiefe (c) bezeichnet. Das maximale FOV ergibt sich aus Sensorgröße(W) und Brennweite(f).

2.4.2 Entozentrische Optiken

Entozentrische Objektive entsprechen der menschlichen Perspektive. Ein entozentrisches Objektiv besitzt einen festen Öffnungswinkel, der von der Sensorgröße und der Brennweite abhängt (Abb. 2.13). Die Fläche des optimalen Fokus ist eine Halbkugel um das optische Zentrum.

$$\alpha_{FOV} = \arctan\left(\frac{W}{2f}\right) \quad (2.27)$$

Diese Art des Blickfeldes wird auch „angular FOV“(AFOV) genannt [35]. Objekte mit gleicher Größe werden dadurch in unterschiedlichem Abstand verschieden groß abgebildet, siehe Gleichung (2.28).

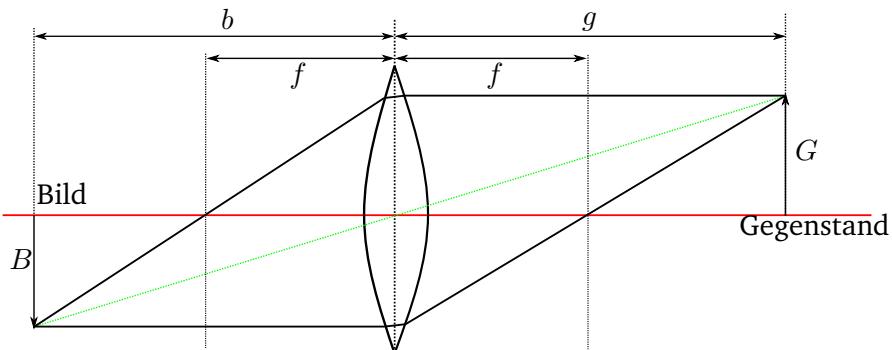


Abbildung 2.13: Bei entozentrischen Objektiven ändert sich das Verhältnis aus Gegenstandsgröße(G) und Bildgröße(B) abhängig von der Gegenstandsweite(g).

$$\frac{G}{B} = \frac{g - f}{f} \quad (2.28)$$

Entozentrische Objektive enthalten also einen perspektivischen Fehler.

2.4.3 Telezentrische Optiken

Telezentrische Objektive verhindern diesen perspektivischen Fehler, indem sie über ein konstantes FOV verfügen. Diese Art des Blickfeldes wird auch „non-angular FOV“ genannt, da der Öffnungswinkel im Idealfall $\alpha_{FOV} = 0^\circ$ beträgt. Der Vorteil der telezentrischen Optik besteht darin, dass Objekte unabhängig vom Abstand immer gleich groß abgebildet werden [35].

$$\frac{G}{B} = const. \quad (2.29)$$

Außerdem werden Strukturen, von denen Konturen erkannt werden müssen, nur von der Vorderseite und nicht durch die Perspektive zum Rand hin schräg abgebildet (Abb. 2.14). Dies und die planare Form der Fokusebene ist für Messungen, die in einer Ebene stattfinden sollen, ein großer Vorteil.

Der Nachteil eines Öffnungswinkels von 0° besteht darin, dass das maximale FOV auf den Durchmesser des Objektivs beschränkt ist, welcher üblicherweise für große Durchmesser stark im Preis steigen. Damit sind telezentrische Objektive für das System, was größere Arbeitsbereiche bis 300 mm Abdecken soll, ungeeignet.

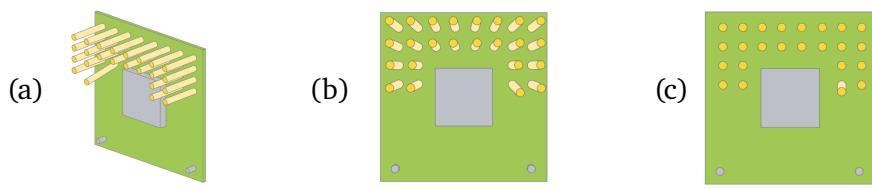


Abbildung 2.14: (a) Ein Chip mit einem verbogenem Pin, der erkannt werden soll; (b) Aufsicht durch eine entozentrischen Optik; (c) Aufsicht durch eine telezentrischen Optik. Der Fehler kann in der Abbildung durch die telezentrische Optik, beispielsweise durch Vergleich der Pixel mit einer überlagerten Referenz erkannt werden [36].

2.5 Optische Fehler

Die am häufigsten vorkommenden optischen Fehler sind die chromatische und sphärische Aberration, Astigmatismus, Koma, Verzerrungen und die Vignettierung. Aberrationen, Astigmatismus und Koma führen zu Schärfeverlust. Vignettierung und Streulicht führen zu Kontrastverlust. Verzerrungen führen dazu, dass gerade Kanten nicht mehr gerade und parallele Kanten nicht mehr parallel sind. All diese Eigenschaften wirken sich negativ auf die Bildverarbeitung und somit auf die Messung aus und müssen minimiert werden.

Die Aberrationen, Koma, Astigmatismus und die Schärfe einer Optik sind stark abhängig von der Blendenzahl. Sie können somit durch richtiges Einstellen der Blende minimiert werden. Das Optimum der Blende beträgt bei den meisten Objektiven zwischen F5,6 und F9. Die F-Zahl ist eine Angabe der Öffnungsweite einer Blende. Darunter besteht zu wenig Schärfentiefe und darüber nehmen Beugungseffekte an der Blende stark zu [37].

2.5.1 Chromatische Aberration

Bei der chromatischen Aberration handelt es sich um einen Effekt, bei dem Farben an Objektkanten verfälscht sind. Dies sorgt für verwaschene Kanten und ist deshalb ungünstig für Kantenerkennungsfilter. Dieser Effekt tritt auf, da das Licht je nach Wellenlänge unterschiedlich stark gebrochen wird. Also wird ein Strahl eines Objekts mit gleicher Position je nach Farbe des Objekts an einen anderen Ort auf den Sensor abgebildet. Dieser Effekt nimmt wie viele andere Effekte in Objektiven zum Rand hin weiter zu, da das Licht am Rand der Optik stärker gebrochen werden muss, um auf dem Sensor zu landen (Abb. 2.15).

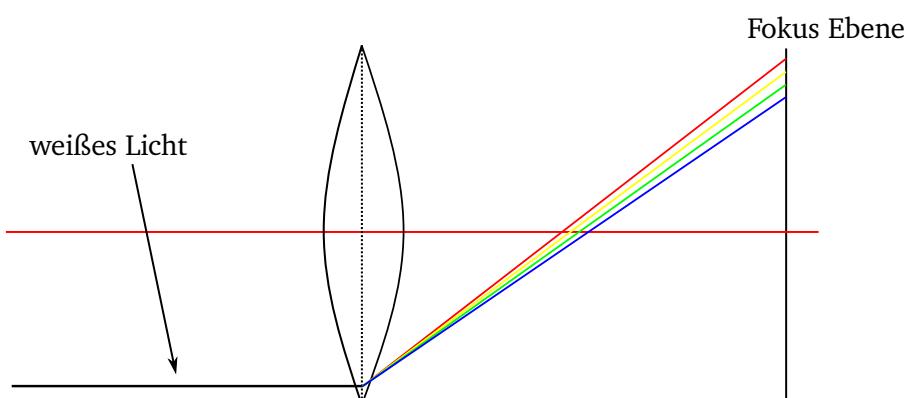


Abbildung 2.15: Aufspaltung des Lichts in sein Spektrum aufgrund der Abhängigkeit zwischen Brechungswinkel und Wellenlänge. Unterschiedliche Position auf dem Sensor sind die Folge.

Die chromatische Aberration ist ebenfalls abhängig von der Working Distance (WD) und dem FOV. Es ist möglich, diesen Effekt für spezielle Abstände zu minimieren und Optiken zu entwickeln, die genau für eine Anwendung minimale chromatische Aberration aufweist. Beim Verlassen dieser optimalen Ebene wird der Effekt dadurch aber umso stärker. Dies wäre für den Messplatz ungeeignet, da dieser flexibel sein soll und auch die Möglichkeit für verschiedene WD besitzen sollte. Die meisten Optiken bilden einen Kompromiss, sodass sie über eine weite WD möglichst minimale chromatische Aberration besitzen [38]. Zusätzlich lässt sie sich durch die richtige Wahl der Blende oder alternativ in der Nachbearbeitung der Rohdaten des Sensors (RAW) minimieren.

Sie lässt sich quantifizieren, indem beispielsweise die rote und grüne Bildinformation einer dunklen, idealen Kante durch ein Differenzbild verglichen werden. Ohne chromatische Aberration müssten diese exakt übereinander liegen, aber durch die Aberration sind die Kanten zueinander versetzt. Diese Versetzung zwischen den Kanten kann anschließend in μm oder Pixeln angegeben werden.

2.5.2 Koma

Koma entsteht beim schrägen Eintreffen paralleler Strahlen in eine sphärische Linse. Dabei treffen sich die Strahlen nicht wie gewünscht im gleichen Brennpunkt, sondern variieren leicht zu einer Richtung (Abb. 2.16.) Dadurch ist insbesondere bei hellen Bildpunkten eine tropfen- oder schweifförmige Verzerrung zu sehen. Der Schweif zeigt dabei immer in radialer Richtung nach außen. Dies wird zum Rand der Optik ausgeprägter, weshalb er durch Abblenden verringert werden kann [39]. Durch die Verwendung mehrerer spezieller Linsen im Objektiv kann dieser Effekt ebenfalls verringert werden.

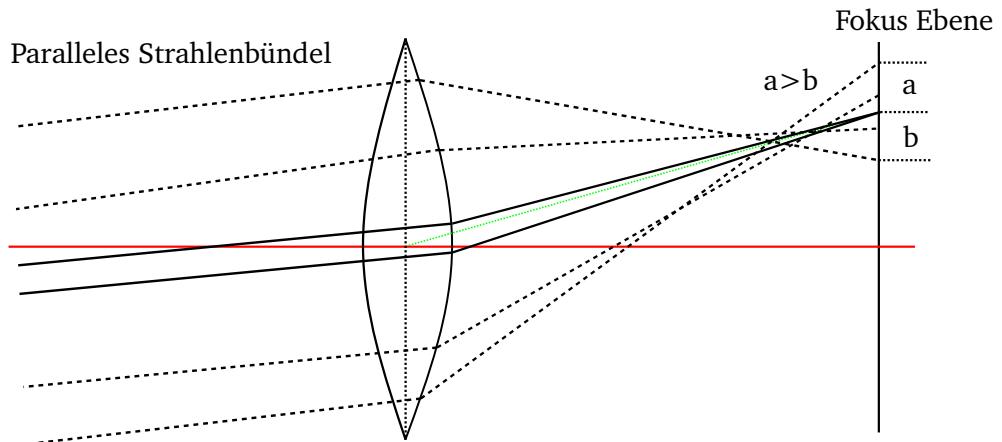


Abbildung 2.16: Strahlengang beim Koma Fehler bei einem parallel eintreffenden Strahlenbündel. Da $a>b$ entsteht eine tropfenförmige Verzerrung in radialer Richtung.

2.5.3 Sphärische Aberration

Die sphärische Aberration kann als eine Änderung der Brennweite durch die Änderung der Blende definiert werden [40]. In Abb. 2.17 ist zu sehen, wie Strahlen, die weiter von der optischen Achse entfernt in das Objektiv eintreffen, bereits vor der Sensorebene fokussieren. Dies wird longitudinale sphärische Aberration genannt. Außerdem ist erkennbar, dass diese Strahlen oberhalb oder unterhalb der optischen Achse auf die Sensorebene treffen. Dies wird als transversale sphärische Aberration bezeichnet [40].

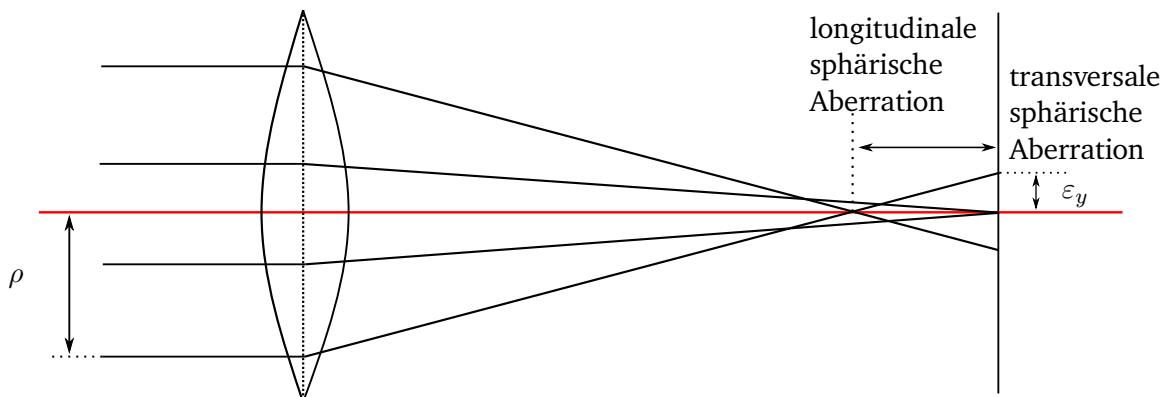


Abbildung 2.17: Strahlen die weiter außen in die Linse eintreten, haben eine kleinere Brennweite, wodurch sie nicht in der Sensor Ebene fokussieren.

Dieser Effekt nimmt ebenfalls zum Rand der Optik stark zu (Abb. 2.18).

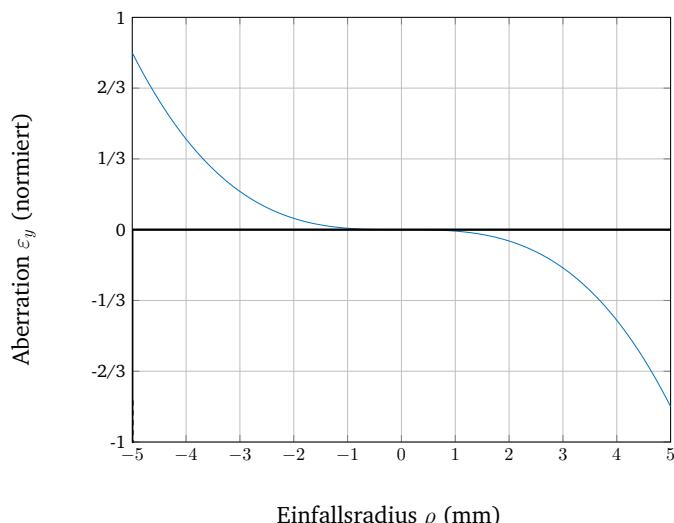


Abbildung 2.18: Transversale Abweichung der Strahlen von der Optischen Mitte ε_y als Funktion des Einfalls Radius ρ . Bei einem Lichteinfall unterhalb der optischen Achse (unten Links in Abb. 2.17) gibt es eine positive Abweichung vom idealen Brennpunkt (oben rechts in Abb. 2.17)[40].

2.5.4 Astigmatismus

Beim Astigmatismus wird ein einfallendes Strahlenbündel in der Meridional- und der Sagittalebene unterschiedlich stark gebrochen. Meridional- und Sagittalebene bezeichnen hierbei zwei 90° zueinander versetzte Ebenen (Abb. 2.19). In Richtung der Sagittalebene ist die Linse perspektivisch verkürzt, woraus eine kürzere Brennweite resultiert. Er wird meistens durch Ungenauigkeit in den Linsenabständen verursacht, wenn sie beispielsweise in ihrer Optische Achse verschoben oder untereinander gekippt sind [41]. Dies hat den Effekt, dass Objekte, die außerhalb der optischen Achse liegen, unscharf abgebildet werden.

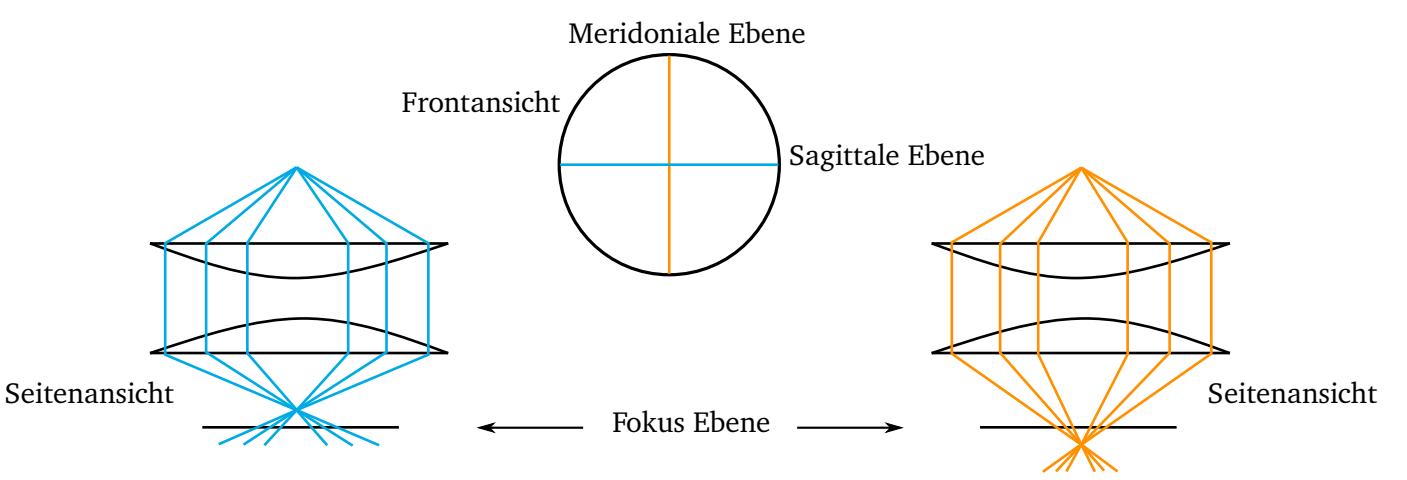


Abbildung 2.19: Strahlengang beim astigmatischen Fehler. In sagittaler Richtung ist der Brennpunkt vor Fokusebene und in meridionaler Richtung ist der Brennpunkt hinter Fokusebene [41].

2.5.5 Vignettierung

Die Vignettierung ist der Effekt, dass Bilder am Bildrand und insbesondere in den Ecken dunkler sind als in der Bildmitte. Dies hat den Grund, dass an diesen Stellen weniger Licht auf den Sensor trifft. Eine extreme Vignettierung tritt auf, wenn ein zu kleines Objektiv für den Sensor gewählt wird. Dadurch erreicht kaum noch Licht mehr den Rand des Sensors und es entsteht ein dunkler Kreis um das Bild.

2.5.6 Verzerrung

In jedem Optischen System treten immer auch Verzerrungen auf. Die Verzerrung ist eine Art der geometrischen Aberration, bei der Punkte im Vergleich zum idealen Lochkameramodell deplatziert werden. Es tritt in der Theorie kein Informationsverlust auf, da die Information nur deplatziert wird. Somit wäre es möglich, jede Verzerrung vollständig zu rekonstruieren. Praktisch würde jedoch eine unendliche Auflösung benötigt werden, um eine immer engere Deplatzierung beheben zu können. In dieser Arbeit werden die Verzerrungen nach dem erwähnten Brown-Conrady Modell modelliert (vgl. Abschnitt 2.2) [18]:

$$x_u = x_d + (x_d - x_c) \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6 + \dots) + \\ [p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot (x_d - x_c)^2 + 2p_2 \cdot (x_d - x_c)(y_d - y_c)] \cdot (1 + p_3 \cdot r^2 + p_4 \cdot r^4 + \dots) \quad (2.30)$$

$$y_u = y_d + (y_d - y_c) \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6 + \dots) + \\ [2 \cdot p_1 \cdot (x_d - x_c) \cdot (y_d - y_c) + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot (y_d - y_c)^2)] \cdot (1 + p_3 \cdot r^2 + p_4 \cdot r^4 + \dots) \quad (2.31)$$

Das Brown-Conrady Modell kann radiale und tangentiale Verzerrungen modellieren. Hierbei sind (x_u, y_u) die unverzerrten Punkte, (x_d, y_d) die verzerrten Punkte und (x_c, y_c) ist das Zentrum der Verzerrung. Die radiale Entfernung vom Verzerrungszentrum ist $r = \sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}$. Für $k_1 > 0$ handelt es sich meistens um Barrel- und $k_1 < 0$ um Pincushion Distortion [16].

Die Verzerrung ist in % angegeben und wird nach folgender Formel berechnet:

$$F_{Dist} = \frac{|(x_{real}, y_{real}) - (x_c, y_c)| - |(x_d, y_d) - (x_c, y_c)|}{|(x_d, y_d) - (x_c, y_c)|} [\%]. \quad (2.32)$$

Hierbei ist $|(x_{real}, y_{real}) - (x_c, y_c)|$ die reale Distanz zur Bildmitte und $|(x_d, y_d) - (x_c, y_c)|$ die mit Verzerrung gemessene Distanz zur Bildmitte. Die Verzerrung eines Objektives ist die mittlere prozentuale Abweichung vom idealen Lochkameramodell.

Es wird unterschieden zwischen positiver und negativer Verzerrung (Abb. 2.20). Die negative Verzerrung wird auch Barrel Distortion und die Positive Pincushion Distortion genannt (vgl. Abschnitt 2.2) [42].

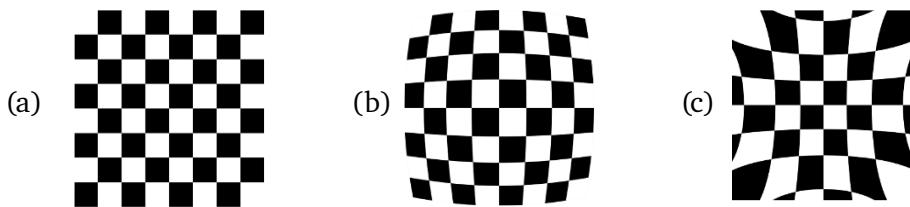


Abbildung 2.20: (a) Das unverzerrte Bild; (b) Barrel distortion (negativ); (c) Pincushion distortion (positiv) [16].

2.6 Bewertung Optischer Systeme

2.6.1 Die Modulationtransferfunktion

Zum Auflösevermögen eines Systems gehören die tatsächliche Auflösung und der Kontrast [43]. Bei einem Bild mit identischer Auflösung, aber geringeren Kontrast ist es schwieriger, das gleiche Detail zu erkennen. Um das Auflösevermögen von Objektiven zu bewerten und zu vergleichen, kann eine Modulationtransferfunktion (MTF), welche auch Spatial Frequency Response (SFR) genannt wird, betrachtet werden.

Dass auch Objektive eine maximale optische Auflösung haben, erkennt man an einer auftretenden Kontrastabnahme bei feineren Strukturen. In Abb. 2.21 ist eine beispielhafte Auswertung eines Testaufbaus zu sehen, bei dem ein Bild mit immer schneller alternierenden schwarzen Balken aufgenommen und der Kontrast gemessen wird.

Der Kontrast beschreibt den Unterschied zwischen den hellsten und dem dunkelstem Bildpunkt. Bei der MTF wird häufig der Michelson-Kontrast K_M verwendet, der folgendermaßen definiert ist:

$$K_M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad \text{mit: } 0\% \leq K_M \leq 100\%, \quad (2.33)$$

wobei L die Leuchtdichte in cd m^{-2} angegeben wird.

Von links nach rechts erhöht sich die Anzahl der Linienpaare pro mm. Dabei ist eine deutliche Abnahme des Kontrastes zu erkennen. Die MTF trägt diesen gemessenen Kontrast gegenüber der Raumfrequenz [Linienpaaren/mm] auf. Die Ursache für diese Kontrastabnahme liegt in der Beugung des Lichts an der Blende des Objektivs [43]. Nach dem Huygensschen Prinzip kann jeder Punkt einer elektromagnetischen Wellenfront Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle sein. Nach einer kleinen Öffnung tritt deshalb eine Beugung des Lichtes auf.

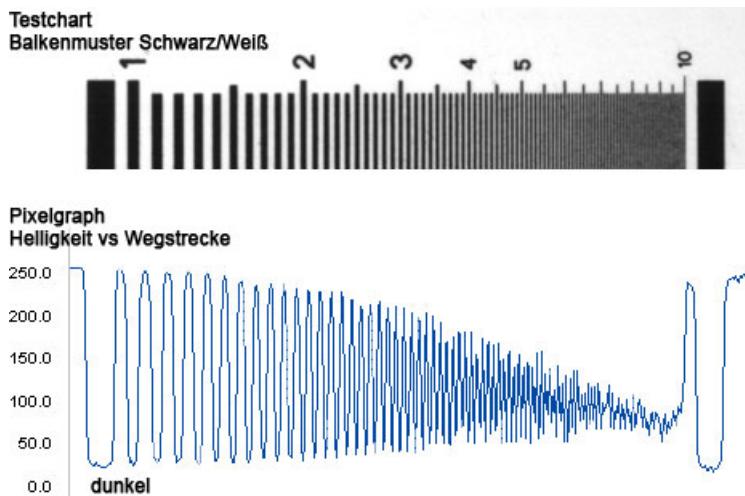


Abbildung 2.21: Sichtbare Kontrastabnahme bei engeren Linienpaaren [43].

In der Sensorebene ergibt sich durch die radialsymmetrische Blende ebenfalls ein radiales Interferenzmuster (Abb. 2.22) [43]. Dadurch ist das ideale Rechtecksignal, das durch eine scharfe Kante an einem schwarz-weissen Linienpaares entstehen müsste, verfälscht. Wenn sich nun zwei dieser Beugungsmuster zu nahe kommen, sind diese ab einer Grenze, der sog. Grenzauflösung, nicht mehr differenzierbar.

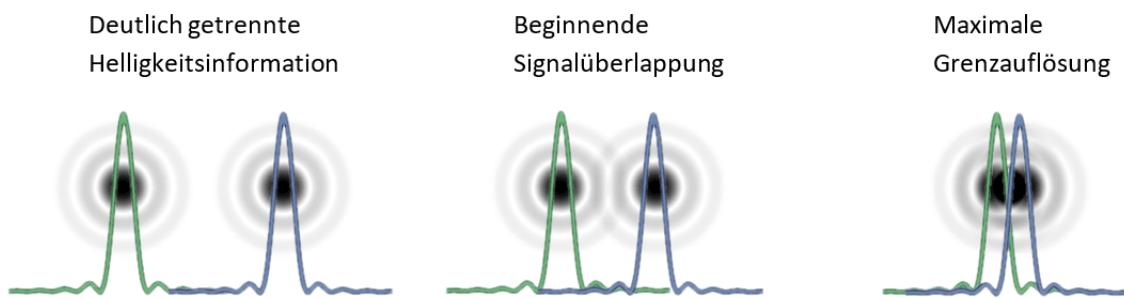


Abbildung 2.22: Schlechte Differenzierbarkeit bei geringerem Abstand der Linien [43].

Mithilfe der MTF können Aussagen über das Auflösevermögen, Kontrast, chromatische Aberration und den Astigmatismus getroffen werden. Jedoch liefert sie keine Aussage über andere zu beachtende Effekte wie die Verzerrung, Vignettierung oder Farbwiedergabe.

2.6.2 Messung der Modulationstransferfunktion

Es ist wichtig zu wissen, dass die MTF immer das Auflösevermögen des Gesamtsystems bewertet. Es ist also nicht möglich, eine Aussage über die Schärfe eines Objektives oder Sensors an sich zu tätigen, sondern immer nur über Gesamtsysteme. Wenn also beispielsweise zwei Objektive verglichen werden sollen, muss dabei die gleiche Kamera mit identischen Einstellungen verwendet werden.

Wie in vorherigen Abschnitten erwähnt, nimmt die Qualität der Abbildungen von Optiken mit höherem Abstand zur Mitte ab. Der höchste Abstand zur Mitte tritt bei einem rechteckigen Sensor in den Ecken auf. Deshalb wird die MTF entlang der Diagonale von der Sensormitte bis zu einer der Ecken aufgetragen (Abb. 2.23). Im Fall eines Vollformatsensors also von 0 mm bis etwa 21,6 mm.

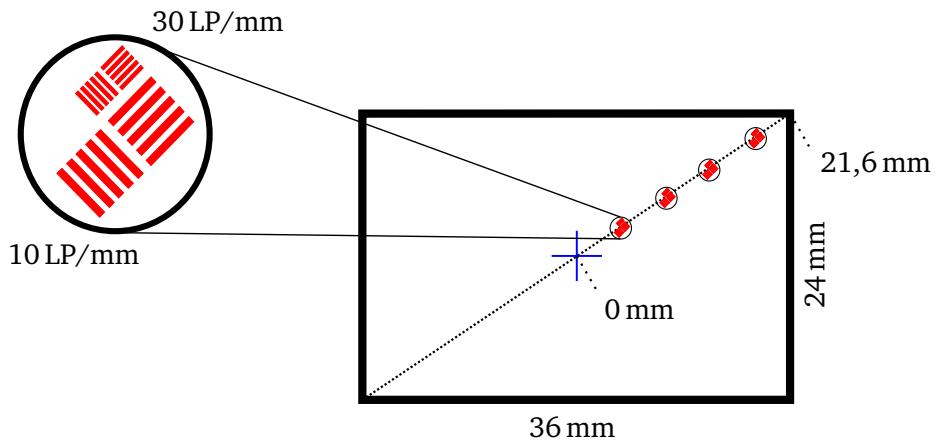


Abbildung 2.23: Die Diagonale eines Vollformatsensors beträgt etwa 43 mm. Somit wird die MTF von der Mitte bis zum Rand von 0 mm bis etwa 21,6 mm aufgetragen.

Da Objektive häufig in verschiedenen Richtungen relativ zu ihrer Symmetrie unterschiedlich gut auflösen, werden die Testlinien orthogonal zueinander versetzt platziert. Dies ermöglicht es, eine Aussage über den Astigmatismus treffen zu können (vgl. Abschnitt 2.5.4).

Es gibt mehrere gängige Arten die MTF aufzutragen (Abb. 2.24). Zum Beispiel der Kontrast (Modulation) gegenüber dem Abstand zur Mitte des Objektivs, die häufig von Objektivherstellern verwendet wird. Alternativ wird auch der Kontrast gegenüber der Raumfrequenz aufgetragen, wobei die Abstände zur Mitte durch verschiedene Farben dargestellt werden können.

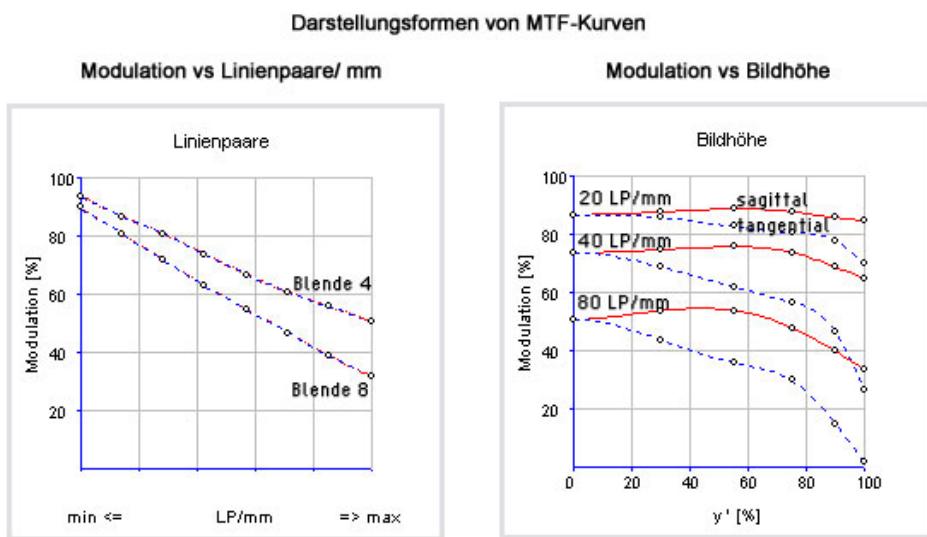


Abbildung 2.24: Links: MTF als Modulation gegen LP/mm ; Rechts: MTF als Modulation gegen Abstand zur Bildmitte [43].

Zusätzlich wird zur MTF die verwendete Blendenzahl, Brennweite und WD angegeben, da sie von diesen Parametern ebenfalls abhängt. Um nun beispielsweise verschiedene Objektive mittels ihrer MTF zu vergleichen, gibt es einige Faktoren die beachtet werden können.

Wichtig ist ein möglichst hoher Kontrast, gleichmäßig bis zum Rand des Objektives. Ein höherer Kontrast bei gleicher Raumfrequenz ist zu bevorzugen. Außerdem sollten die meridionale und sagittale Kennlinie möglichst nahe beieinander liegen, da dies einen geringen astigmatischen Fehler widerspiegelt. Eine typische MTF ist in Abb. 2.25 zu sehen. Der Kontrast nimmt mit zunehmendem Abstand von der Bildmitte sowie bei höheren Raumfrequenzen ab. Ein insgesamt geringerer Kontrast ergibt sich bei einer weit geöffneten Blende aufgrund des geringen DOF.

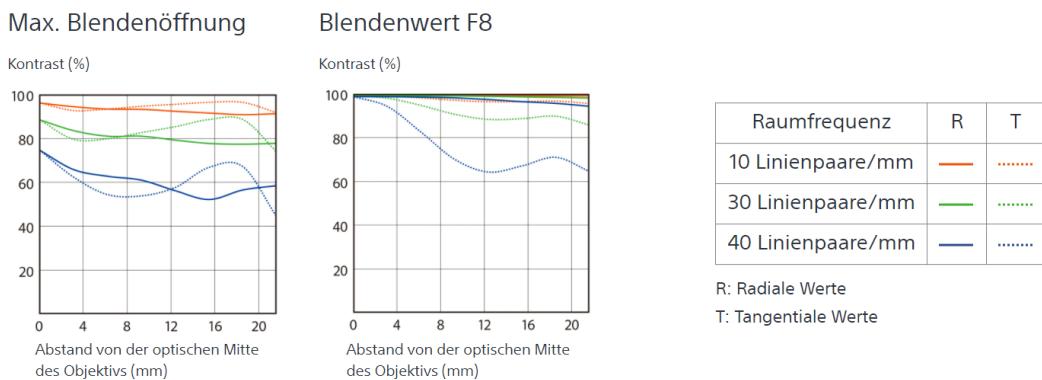


Abbildung 2.25: Eine typische MTF eines Objektivs. Bei weit geöffneter Blende ist der Kontrast aufgrund des geringen DOF geringer als bei Blende F8 [44].

Ab ungefähr 40% endet der noch sinnvoll mit Filtern erkennbare Kontrast. Deshalb wird häufig die Raumfrequenz, bei der noch 50% des Maximalkontrasts vorhanden ist (MTF50), gewählt [45].

Es gibt nun verschiedene Wege, die MTF auszuwerten. Einerseits ist es möglich, mit Targets wie dem „USAF-1951 Target“ visuell auszuwerten, welche Liniendichte noch differenzierbar ist (Abb. 2.26). Diese manuelle Auswertung ist jedoch sehr subjektiv und abhängig vom Betrachter und seinem Sehvermögen. Dies entspricht bei den meisten Menschen einem noch wahrnehmbaren Kontrast von 10%-20% also einer MTF10 bis MTF20. Das USAF-1951 Target ist aufgeteilt in Gruppen und Elemente aus Linienpaaren. Je höher Gruppen und Elementnummer, desto höher die Raumfrequenz.

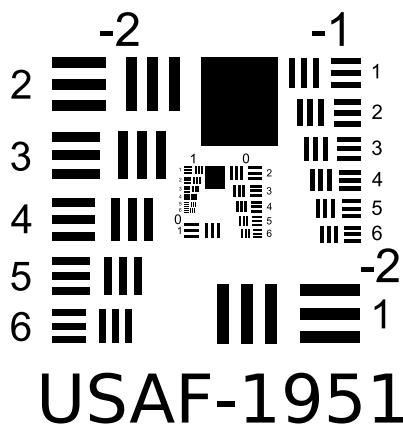


Abbildung 2.26: Das USAF-1951 Target von Gruppe -2 bis Gruppe 0. Die Gruppennummer steht dabei immer über einer Gruppe und die Elementnummern seitlich neben einem Element. Die Testlinien sind orthogonal zueinander angeordnet, um mögliche unterschiedliche Auflösungen in x und y Richtung zu messen.

Bis etwa Gruppe 4 Element 3 bzw. 20,16 LP/mm ist es noch möglich, diese Targets auf Papier zu fertigen. Bei kleineren Elementen wird dies meist nur durch mit Chrom beschichtetem Glaselementen ermöglicht [33]. Bei diesen Größenordnungen ist es auch zu empfehlen, eine telezentrische Hintergrundbeleuchtung zu verwenden, da es bei nicht telezentrischen Lichtquellen zu Fehlern durch den Abstrahlwinkel der Lichtquelle kommt. Zusätzlich eignet sich eine Hintergrundbeleuchtung allgemein besser zur Kantenerkennung als ein Auflicht, da alle Oberflächendetails eliminiert werden und somit nicht stören können. Obwohl die MTF somit also visuell auswertbar ist, bieten Softwareansätze genauere und wiederholbare Ergebnisse. Die am häufigsten verwendete Methode ist die sog. „Slanted-Edge-Methode“.

2.6.3 Slanted Edge Methode

Die Slanted-Edge-Methode wird verwendet, um die MTF zu bestimmen und wird in der ISO12233 beschrieben. Die aktuellste Version dieser Norm ist aus dem Jahr 2017 [46]. Die Qualität optischer Systeme kann besonders gut an Kanten ermittelt werden. Als Erstes wird dafür eine Aufnahme einer möglichst idealen und geneigten Kante benötigt (Abb. 2.27). Je besser das System diese ideale Kante nun aufzeichnen kann, desto besser die Auflösung. Dabei ist es jedoch einfacher, diese Kante im Frequenzbereich auszuwerten, wobei die Frequenz in LP/mm angegeben ist. Dies ist möglich, da der Frequenzbereich die gleiche Information wie der Raumbereich enthält und sich nur in der Darstellungsform unterscheidet.

Eine schmale und somit präzise Kante im Raumbereich entspricht einem breiten Spektrum im Frequenzbereich. Dies ist ähnlich wie der Zusammenhang zwischen einem schmalen Zeit- und breitem Frequenzbereich.

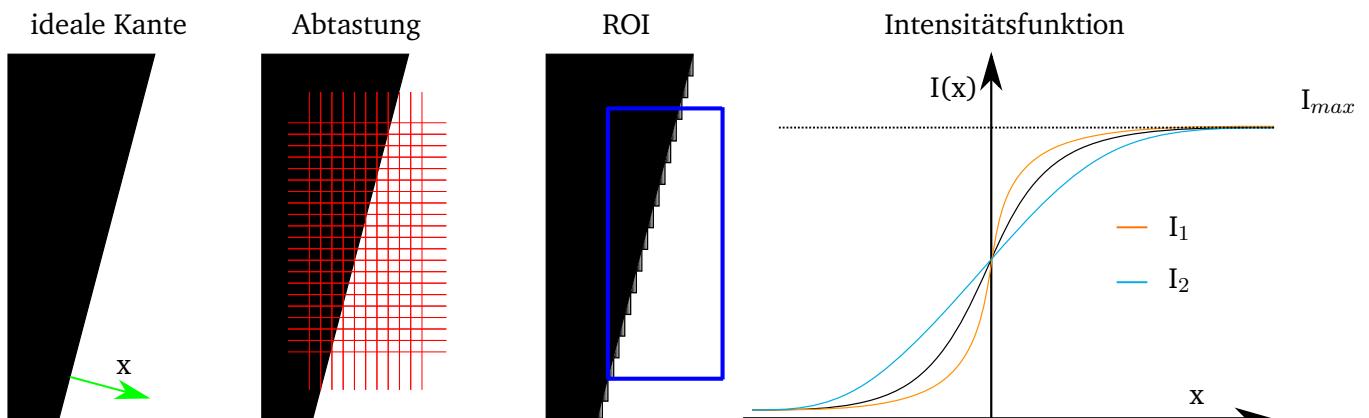


Abbildung 2.27: Eine ideale Kante wird durch ein Messsystem abgetastet. Anschließend wird eine Region Of Interest (ROI) mit der Kante gewählt und die Intensitätsfunktion in diesem Bereich aufgetragen. Bei der Intensitätsfunktion $I(x)$ kann es sich beispielsweise um den Grayscale eines Bildes handeln. Die X-Achse steht dabei senkrecht auf der Kante. I_1 ist aufgrund der stärkeren Steigung die Intensitätsfunktion eines schärferen Systems als I_2 .

Eine ideale Kante entspricht einer räumlichen Sprungfunktion $U(x)$ (Abb. 2.28). Um diesen Sprung im Frequenzbereich darstellen zu können, benötigt es unendlich viele und unendlich hohe Frequenzen, identisch wie bei der zeitlichen Sprungfunktion $U(t)$. Somit würde eine ideale gemessene Kante einer unendlichen Auflösung des Systems entsprechen. Bei einer realen Kante wird nur noch eine endliche Anzahl an Frequenzen benötigt. Somit kann also ein Zusammenhang zwischen einer Kante und aufkommenden Frequenzen gebildet werden [45]. Raum- und Frequenzbereich sind über die Fourier Transformation verbunden.

Der Slanted-Edge-Algorithmus beginnt mit einer Funktion, die die Pixelintensität oder den Grayscale eines Bildes über dem Raum aufträgt. Diese Funktion wird Edge Spread Function (ESF) genannt. Anschließend wird die räumliche Ableitung $\frac{\partial}{\partial x}$ der ESF berechnet, um die Line Spread Function (LSF) zu erhalten. Die MTF ergibt sich nun durch die Fourier Transformation der LSF.

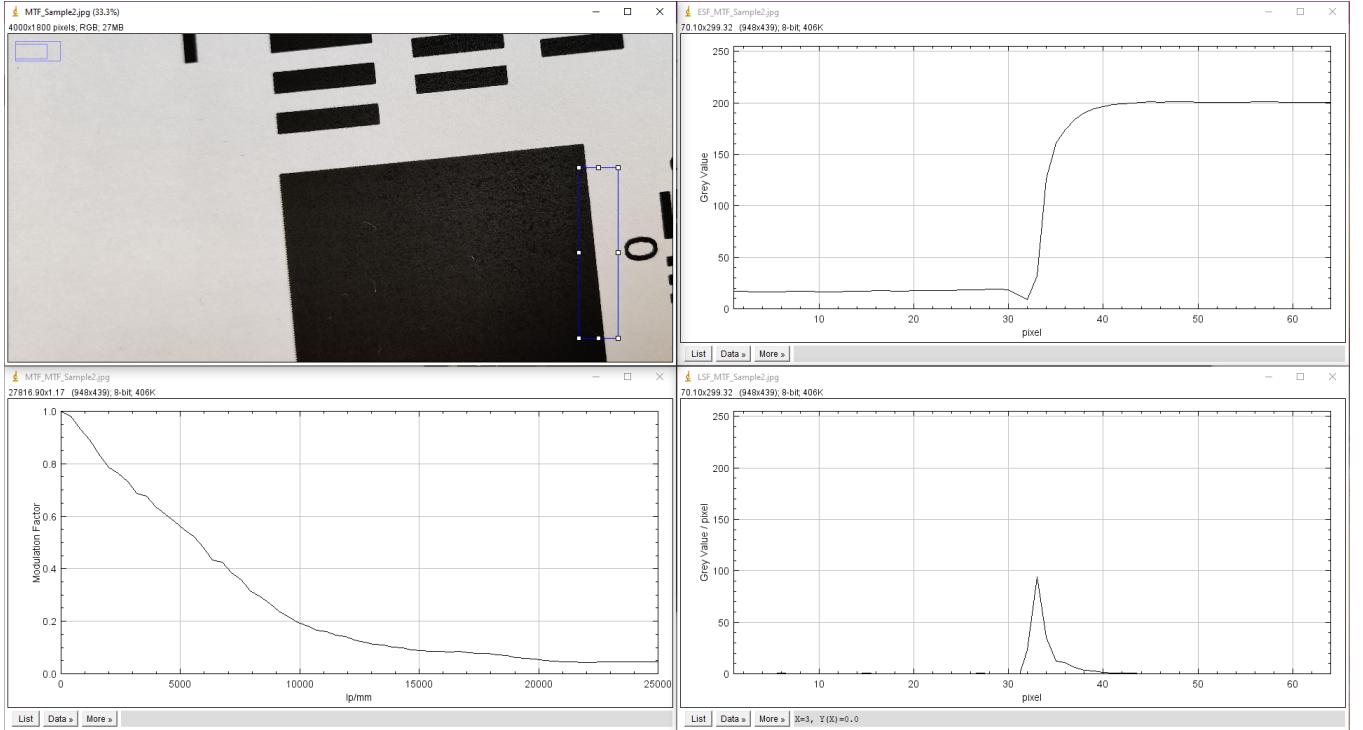


Abbildung 2.28: Oben links: Es wird eine ROI mit der entsprechenden Edge markiert; Oben rechts: Die ESF ergibt sich aus den Pixelwerten; Unten rechts: Die LSF ist die räumliche Ableitung $\frac{\partial}{\partial x}$ der ESF; Unten links: Die MTF ist die Fourier Transformation der LSF.

Die Neigung der Kante ist wichtig, um eine Phasenabhängigkeit von exakt horizontalen oder vertikalen Kanten zu verhindern. Die Räumliche Phase ist hierbei das Verhältnis zwischen der Orientierung der Kante und der Orientierung der Pixel auf dem Sensor [45].

Die optimale Neigung der Kanten beträgt mindestens $\pm 2^\circ$ von den horizontalen, vertikalen und 45° Positionen, da diese sehr phasensensitiv und somit ungenau sind. Zusätzlich sind die fast horizontalen und vertikalen Kanten zu bevorzugen, da mit Winkel nahe der 45° stärkere Fehler einhergehen. In ISO12233 werden die Winkel 5° und 5.71° ($\arctan(0.1)$) empfohlen [46].

Der Kontrast der Kante hat mathematisch gesehen keinen Einfluss auf die Berechnung der MTF, jedoch sollte er hoch genug sein, um die Kante trotz Rauschen noch gut zu erkennen. Andererseits sollte er ebenfalls 1:10 nicht überschreiten, da sonst ein Clipping Fehler auftreten kann. Dies passiert dadurch, dass die Pixel an den Kanten zu schnell in Sättigung geraten (vgl. Abschnitt 2.3.2). Somit ergibt sich eine schmale Kante im Bild, was für eine hohe Auflösung sprechen würde, dabei ist der dynamische Bereich zu groß, um von der Kamera aufgefangen zu werden. Dieses Problem war bei dem Test Chart aus der ISO12233:2000 noch der Fall. Empfohlen wird deshalb seit ISO12233:2017 ein Test Chart mit Kontrast von 1:4 [46]. Diese Test Charts besitzen nun über den Bildbereich verteilt mehrere 90° zueinander versetzte Kanten, um die meridionale und sagittale MTF bestimmen zu können (Abb. 2.29).

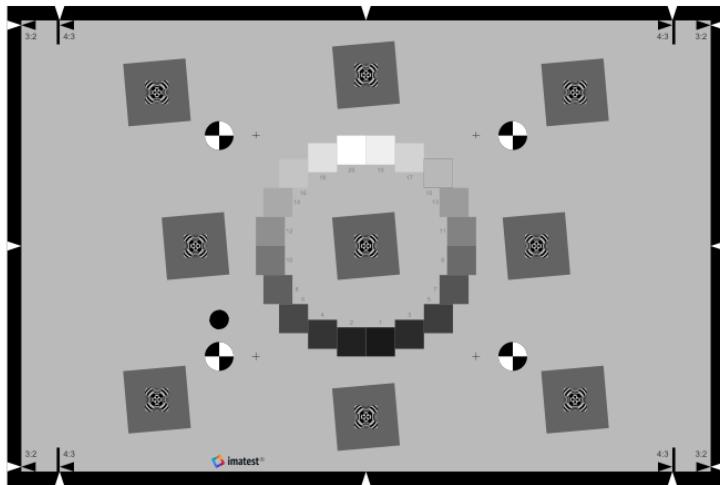


Abbildung 2.29: Der Test Chart nach ISO12233:2017. Er verfügt über den kompletten Bereich verteilte und geneigte Kanten, die 90° zueinander versetzt sind [46].

2.7 Beleuchtung

Der Aspekt der Beleuchtung ist einer der Wichtigsten beim Erstellen eines optischen Messsystems. Die Hauptschwierigkeit bei solchen Systemen besteht meistens darin, dass zu beobachtende Objekt klar für das Kamerasystem erkennbar zu machen. Dies liegt vor allem daran, dass sich Kameras nicht so gut auf unterschiedliche Gegebenheiten anpassen können wie das menschliche Auge. Aus diesem Grund ist es nicht hilfreich, den Aspekt der Beleuchtung aus der menschlichen Sichtweise zu betrachten. Etwas, was für einen Menschen eventuell gut erkennbar ist, muss für eine Kamera nicht unbedingt gelten. Deshalb muss durch objektive Messungen bestimmt werden, wie genau oder ungenau ein Detail erkennbar ist.

Die Art der optimalen Beleuchtung ist ebenfalls stark abhängig von den zu erkennenden Objekten. Dabei spielen zum Beispiel Farbe, Material, Struktur und die Geometrie eine Rolle. Bei Aufgaben der optischen Qualitätskontrolle wird die Beleuchtung auf die spezielle Anwendung hin optimiert [47].

Bei einem allgemeinem Messplatz hingegen, können die Lichtverhältnisse nicht auf eine exakte Verwendung hin optimiert werden. Deshalb sollten in Helligkeit und Farbe variable Lichtquellen gewählt werden, um den Messplatz möglichst flexibel zu halten.

2.7.1 Probleme bei unzureichender Beleuchtung

Bei falsch gewählter Beleuchtung können einige Probleme auftreten, die die spätere Verarbeitung erschweren. Mögliche Probleme sind zum Beispiel Überbelichtung, Schattenwurf auf relevante Bildbereiche, Schattenwurf an Kanten oder Blooming. Beim Blooming handelt es sich um einen Effekt bei CCD Sensoren, der auftritt, wenn einzelne Photozellen ihre Sättigung erreichen. Dann kann es aufgrund der Rasterverschiebung von CCD-Sensoren (vgl. Abschnitt 2.3.4) dazu kommen, dass überschüssige Ladung in benachbarte Photozellen überspringt [48]. Durch Schattenwurf an Kanten kann es passieren, dass an diesen nicht mehr genug Kontrast vorhanden ist, um sie präzise zu detektieren (Abb. 2.30).

Da die Beleuchtung den maximalen Dynamik-Umfang des Bildes begrenzt, kann eine zu niedrige Beleuchtung somit zu einem schlechten SNR führen.



Abbildung 2.30: Ein Bild mit einseitiger Beleuchtung ohne Diffusionsfilter. Aufgrund des Schattens wird die Kontur des Chips falsch erkannt.

2.7.2 Beleuchtungsarten

Beleuchtung, Blende und ISO müssen aneinander angepasst werden, um eine homogene Helligkeitsverteilung zu erhalten. Da die Blendenzahl aufgrund der optimalen Schärfe unverändert bleiben sollte und eine höhere ISO zu stärkerem Rauschen führt, muss also die Beleuchtung angepasst werden. Je nach Anwendung sind verschiedene Beleuchtungsarten wie Auflicht, Durchlicht, schräges Auf- und Durchlicht sowie eine Dunkelfeldbeleuchtung möglich (Abb. 2.31).

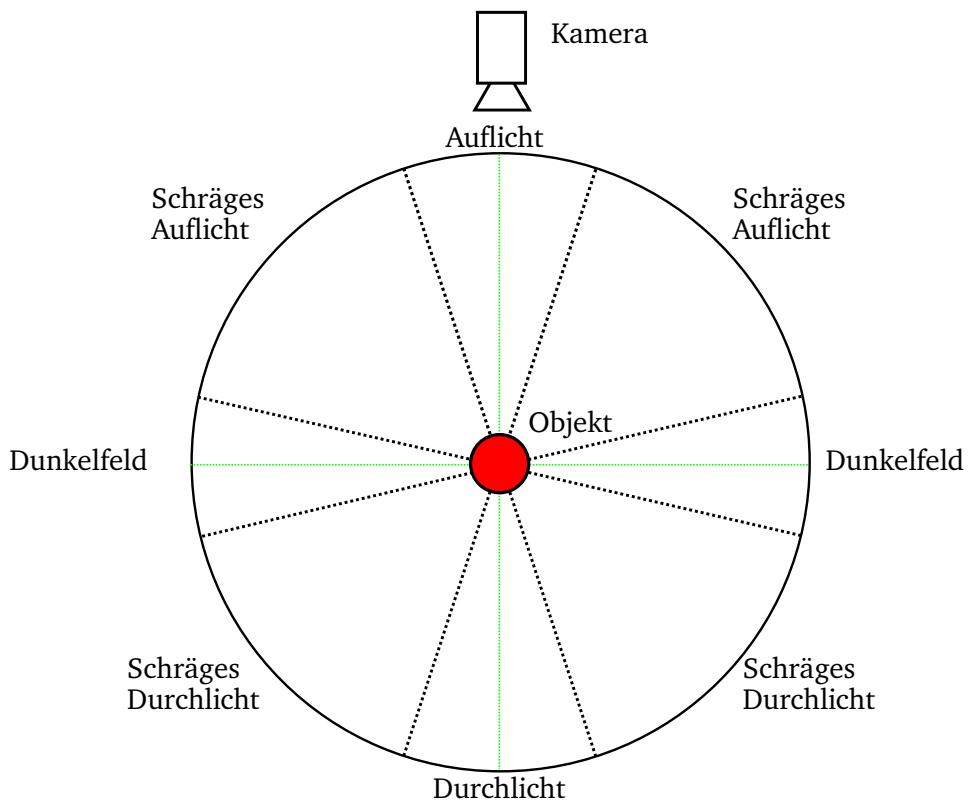


Abbildung 2.31: Verschiedene Arten der Beleuchtung, die je nach Situation gewählt werden können.

Die Dunkelfeldbeleuchtung eignet sich beispielsweise, um Oberflächendetails sichtbar zu machen und eine Durchlichtbeleuchtung sorgt für maximalen Kontrast an Kanten [47]. Für einen allgemeinen Messplatz würde sich am besten eine diffuse axiale Beleuchtung eignen. Diese sorgt dafür, dass die Lichtstrahlen parallel zur Kamerablickrichtung auf das Messobjekt treffen. Somit gibt es kaum Schattenbildung sowie wenig Reflexionen (Abb. 2.32).

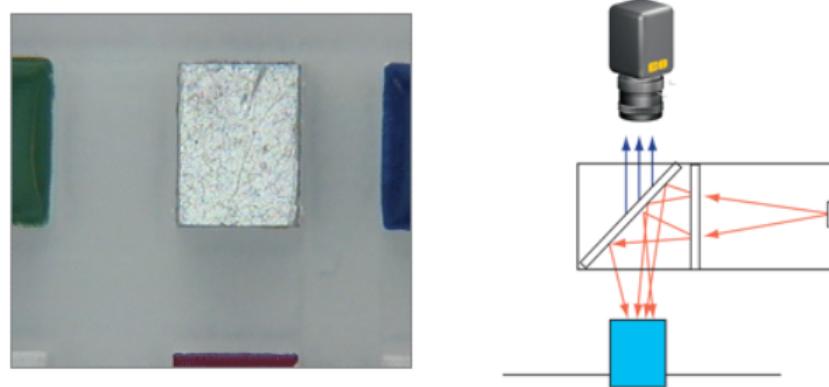


Abbildung 2.32: Bei der diffusen Axialbeleuchtung wird das Licht über einen halb durchlässigen Spiegel auf das Objekt gelenkt. Dies ermöglicht eine Beleuchtung parallel zur Kamerablickrichtung [47].

Eine weitere geeignete Variante ist ein diffuses Auflicht aus mehreren Winkeln. Dies sorgt für geringe weiche Schattenbildung und minimale Reflexion (Abb. 2.32). Zusätzlich ist das diffuse Auflicht einfacher zu realisieren, als eine axiale Beleuchtung.

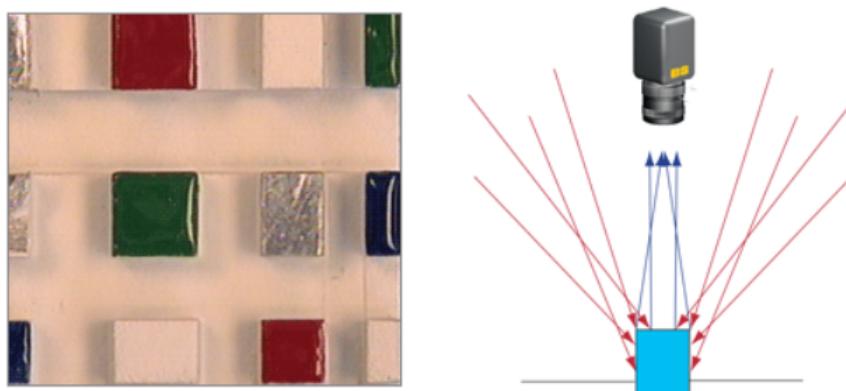


Abbildung 2.33: Beim diffusen Auflicht kommt das Licht aus mehreren, gleichmäßig um das Objekt verteilten, Lichtquellen. Dies sorgt für weiche Schatten, die sich von Objektkanten differenzieren lassen [47].

Der Winkel zwischen Lichtquelle und Optik sollte möglichst gering gehalten werden, um Schatten minimal zu halten. Ein Diffusionsfilter sorgt dafür, dass die Schatten, die übrig bleiben, weich sind und somit einfacher durch die Software von Objektkanten Unterschieden werden können.

Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass möglichst wenig Fremdlicht die Messung beeinflusst. Dies kann beispielsweise durch eine Einhausung oder Abdunklung des Raumes erreicht werden.

3 Auswahl des Kamerasystems

Bei der Auswahl der Kamera und des Objektivs gibt es einige Kriterien, die bei der Konzeption eines Messsystems beachtet werden müssen. Folgende Kriterien werden für die Auswahl der Kamera gewählt: Auflösung, Konnektivität und Fernsteuerbarkeit mit einem PC. Zusätzlich wird die Auswirkung eines Pixelshiftings auf das Auflösevermögen untersucht. Die Auflösung der Kamera ist ausschlaggebend für die maximal erreichbare Grenzauflösung des Systems. Eine schnelle Konnektivität wird benötigt, um große Datenmengen von Messungen schnell zu übertragen. Die PC-Fernsteuerbarkeit bietet mehrere Vorteile. Zum einen ist die Bedienung dadurch leichter und es passieren keine mechanischen Veränderungen oder Verwacklungen am System während einer Messung. Außerdem ist das Aufzeichnen mehrerer Messungen deutlich schneller.

Die Anforderungen an das Objektiv sind eine hohe Schärfe sowie geringe Verzerrung und Aberrationen. Für die Bewertung der Schärfe und chromatischen Aberration wird die Software MTF-Mapper [49] genutzt, die auf dem Prinzip der Slanted-Edge-Methode funktioniert (vgl. Abschnitt 2.6.3). Der Test Chart von MTF-Mapper verfügt über Marker, anhand deren geprüft werden kann, ob er parallel zur Kamera steht. Zusätzlich wird die Schärfe ebenfalls mit Hilfe von USAF-1951 Targets verglichen.

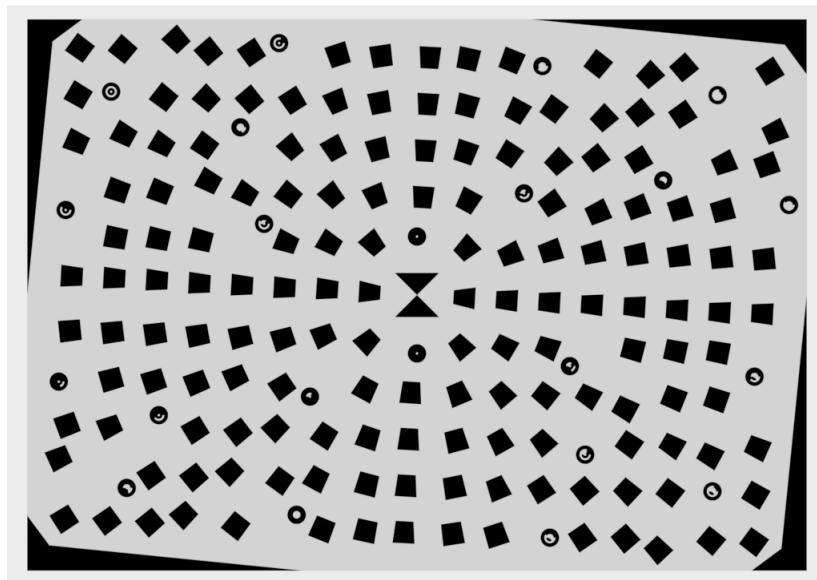


Abbildung 3.1: Zu sehen ist der Test Chart von MTF-Mapper. Die runden Marker ermöglichen das Treffen einer Aussage über die Orientierung [49].

Anhand der gesetzten Kriterien wird eine Vorauswahl an Kameras und Objektiven getroffen. Zusätzlich wird ein maximaler Arbeitsbereich von 30 cm auf 20 cm für das Messsystem gewählt. Bei einer WD von etwa 60 cm ergibt sich ein Öffnungswinkel von $\alpha_{FOV} = 14,03^\circ$. Dieser entspricht nach Gleichung (2.27) einer Brennweite von 60 mm. Alternativ können bei einer WD von 90 cm und einem resultierendem $\alpha_{FOV} = 10,6^\circ$ Objektive mit Brennweiten bis zu 90 mm gewählt werden.

3.1 Kamera

Zur Auswahl stehen die Modelle Alpha 7R3 mit 42,4 Megapixel (Mpix) und Alpha 7R4 mit 61 Mpix von Sony. Beide verfügen über einen Vollformat (24 mm x 36 mm) CMOS Sensor. Für die Tests werden alle Stabilisierungen und Nachbearbeitungsfunktionen der Kameras deaktiviert, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. MTF-Mapper verwendet einen Test Chart, der ähnlich wie der Chart aus ISO12233, über viele Slanted Edges verfügt, um die Schärfe über den gesamten Bildbereich beurteilen zu können (Abb. 3.1). Die Modelle werden mit einem 55 mm F1.8 Objektiv (SEL55F18Z, Zeiss AG) bei einer Blende von F8 und einem Abstand von 58,5 cm verglichen. Bei allen Messungen mittels MTF-Mapper wird auf einen maximalen Verkippungswinkel von 2° sowie eine gleichmäßige Beleuchtung in einem abgedunkeltem Raum geachtet. Der Vergleich mittels MTF-Mapper und dem USAF-1951 Field Target (Abb. 3.2) ergibt, dass die Alpha 7R4 höhere Raumfrequenzen aufzeichnen kann.

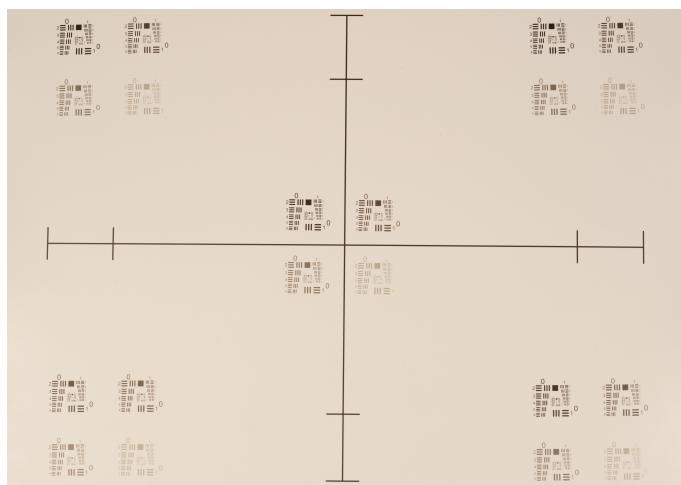


Abbildung 3.2: Das USAF-1951 Field Target besteht aus mehreren USAF-1951 Targets, die über den Bildbereich verteilt sind. Dies ermöglicht eine ortsbezogene Schärfenbewertung. Die mittleren Targets sind etwa 18 mm und die äußeren etwa 115 mm von der Bildmitte entfernt.

Bei einem Arbeitsbereich von 30 cm x 20 cm ergeben sich für die Alpha 7R4 31,6 Pixel/mm und für die Alpha 7R3 26,58 Pixel/mm. Somit betragen die maximalen Grenzauflösungen nach Gleichung (2.25) 15,8 LP/mm und 13,29 LP/mm. Die theoretisch maximale Verbesserung beträgt also etwa 19%. Beide Messungen wurden einmal visuell und anschließend mathematisch mittels MTF ausgewertet (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Die Ergebnisse zeigen eine tatsächlich 12% besseren Auflösung der Alpha 7R4.

Kamera	Grenzauflösung (LP/mm)	Auflösung Mittig (LP/mm)	Auflösung Rand (LP/mm)
Alpha 7R4	15,8	10,1	8,98
Alpha 7R3	13,29	8,98	8

Die Ergebnisse zeigen eine tatsächlich 12% bessere Auflösung der Alpha 7R4.

Beide Modelle verfügen über einen Pixelshift Modus. Die Alpha 7R3 über einen 4:1 und die Alpha 7R4 über einen 16:1 Pixelshift Modus. Das 4:1 Pixelshifting ermöglicht der Alpha 7R3, die volle Farbinformation an jedem Pixel zu erhalten [50]. Durch das 16:1 Pixelshifting verdoppelt sich zusätzlich die maximale Grenzauflösung

der Alpha 7R4 zu 31,5 LP/mm [50].

Die theoretisch maximale Verbesserung des Auflösevermögens beträgt nun also 137% (Tabelle 3.3).

Tabelle 3.2: Die Ergebnisse zeigen eine tatsächlich durchschnittlich 80% bessere Auflösung der Alpha 7R4 im Pixelshift Modus.

Kamera	Grenzauflösung (LP/mm)	Auflösung Mittig (LP/mm)	Auflösung Rand (LP/mm)
Alpha 7R4	31,5	17,95	14,3
Alpha 7R3	13,29	8,98	8,89

Es ist eine durchschnittlich 80% bessere Auflösung der Alpha 7R4 im Pixelshift Modus zu sehen. Aufgrund des höheren Auflösevermögens insbesondere im Pixelshift Modus fällt die Entscheidung für das Messsystem auf die Sony Alpha 7R4.

3.2 Objektiv

Nach einer Vorauswahl werden folgende Modelle verglichen: ein 55 mm F1.8 (SEL55F18Z, Zeiss AG), ein 50 mm F1.4 (SEL50F14Z, Zeiss AG) und ein 90 mm F2.8 Makro (SEL90M28G, Sony AG). Dabei handelt es sich um zwei Normalobjektive und ein Makroobjektiv. Das Makroobjektiv hat hierbei den Vorteil, dass deutlich geringere WD möglich sind. Bei der Auswahl wird auf eine geringe optische Verzerrung geachtet. Verglichen werden die Objektive an der Sony Alpha 7R4 mit einer Blendenzahl von F8.

Zuerst werden die Objektive im normalen Modus ohne Pixelshift verglichen. Zwischen dem Zeiss 55 mm und 50 mm sind keine großen Unterschiede erkennbar. Es ergibt sich eine ähnlich aussehende MTF (Abb. 3.3).

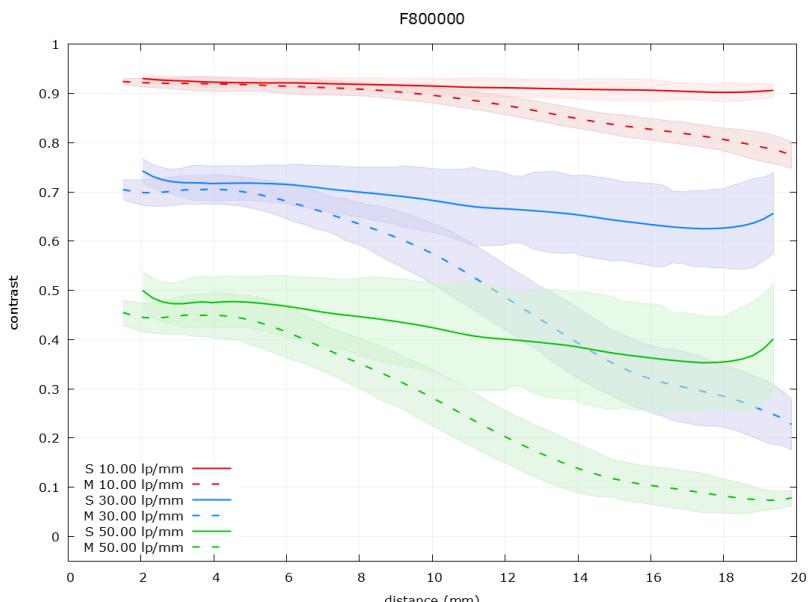


Abbildung 3.3: MTF des Zeiss 55 mm. Aufgrund der Distanz zwischen sagittaler(–) und meridionaler(---) Kennlinie ist Effekt des Astigmatismus erkennbar (vgl. Abschnitt 2.5.4). Der farblich markierte Bereich gibt die Standardabweichung der Werte mit identischer Distanz zur Bildmitte an.

Das Sony 90 mm zeigt höhere Werte der MTF über den gesamten Bereich bis zum Objektivrand. Zusätzlich ist der Abstand zwischen sagittaler und meridionaler Kennlinie geringer, was einen geringeren astigmatischen Fehler bedeutet (Abb. 3.4).

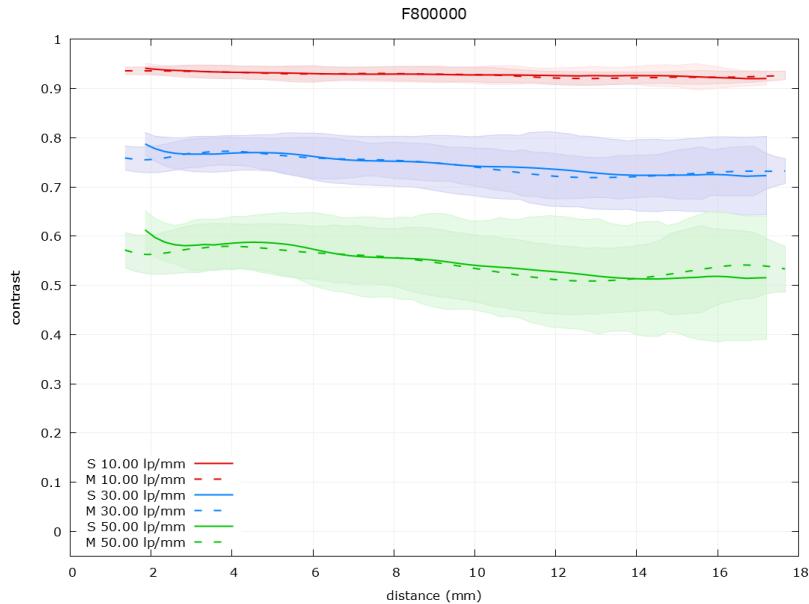


Abbildung 3.4: MTF des Sony 90 mm. Geringerer astigmatischer Fehler und weniger Abnahme des Auflösevermögens bei größerer Entfernung zur Mitte erkennbar.

Ähnliche Ergebnisse ergeben der Vergleich mittels des USAF Field Targets ohne Pixelshift. Da bei diesem Test die Sony Alpha 7R4 verwendet wird, beträgt die Grenzauflösung wieder 15,8 LP/mm. Wie auch beim Vergleich durch MTF, ist nach einmaliger Auswertung kein Unterschied zwischen dem 55 mm und 50 mm erkennbar.

Tabelle 3.3: Die beide Objektive von Zeiss schneiden beim Vergleich mit dem USAF Target ähnlich ab. Es ist ebenfalls wie in den MTF, das bessere Auflösevermögen des Sony 90 mm zu erkennen.

Kamera	Grenzauflösung (LP/mm)	Auflösung Mittig (LP/mm)	Auflösung Rand (LP/mm)
Zeiss 55 mm	15,8	10,1	8,98
Zeiss 50 mm	15,8	10,1	8,89
Sony 90 mm	15,8	12,7	10,1

Bei gleichen Messungen mit Pixelshift ist eine allgemeine Verbesserung der MTF von etwa 30% über alle Objektive hinweg zu erkennen. Außerdem werden die Unterschiede zwischen dem 50 mm und dem 55 mm etwas deutlicher, wobei das 50mm beispielsweise bei 30 LP/mm in Sagittalebene einen um 60% höheren Kontrast aufweist als das 55 mm. Das 90 mm Makro Objektiv schneidet auch in diesem Test mit dem höchsten Kontrast bis zum Bildrand am besten ab.

Die unterschiedlichen MTF lassen sich auch über den kompletten Sensorbereich in einem 3D Plot auftragen (Abb. 3.5). Die Achsen entsprechen dabei den Sensorabmessungen des Vollformats von etwa 26 mm auf 36 mm und die Höhe einspricht der MTF50. Die 2D Darstellung der MTF entspricht qualitativ dem Mittelwert der Positionen, die gleichen Abstand zur Sensormitte haben. Die farblich markierte Standardabweichung aus Abb. 3.3 entspricht somit der Schwankung, die in den 3D Plots beobachtet werden kann. So ist oben links in Abb. 3.5 die gleiche Kontrastabnahme in Meridionalrichtung zu erkennen wie in Abb. 3.3.

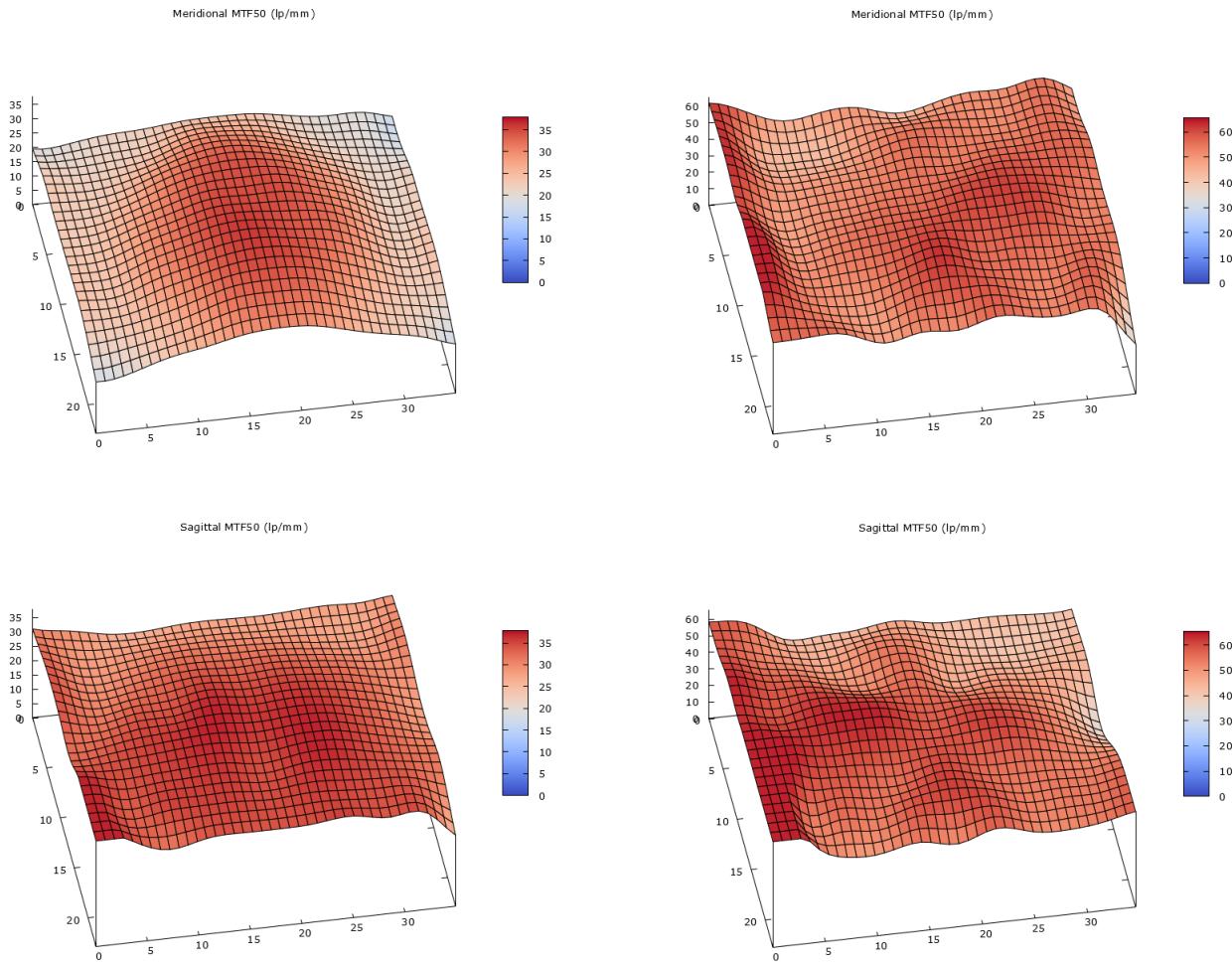


Abbildung 3.5: Links das Zeiss 50 mm und rechts das Sony 90 mm in sagittaler und meridionaler Richtung. Es sind gleichmäßiger und höherer Werte für die MTF50 beim Sony 90 mm erkennbar. Oben links ist ebenfalls die starke Abnahme in meridionaler Richtung wie in Abb. 3.3 zu sehen.

Neben der Schärfe wurde mittels MTF-Mapper ebenfalls die chromatische Aberration (vgl. Abschnitt 2.5.1) verglichen. Dabei ist erkennbar, dass das Zeiss 55 mm über die höchste chromatische Aberration mit bis zu 15 μm am Rand besitzt (Abb. 3.6). Danach folgt das Zeiss 50 mm und das Sony 90mm mit bis zu 6 μm . Dabei ist zu sehen, dass das Sony 90 mm eine gleichmäßigere Intensität der Aberration aufweist. Bei einer Pixelgröße von 3,73 μm der Alpha 7R4 entspricht dies also einer Abweichung von etwa vier Pixel beim Zeiss 55 mm bis einem Pixel beim Zeiss 50mm und dem Sony 90 mm.

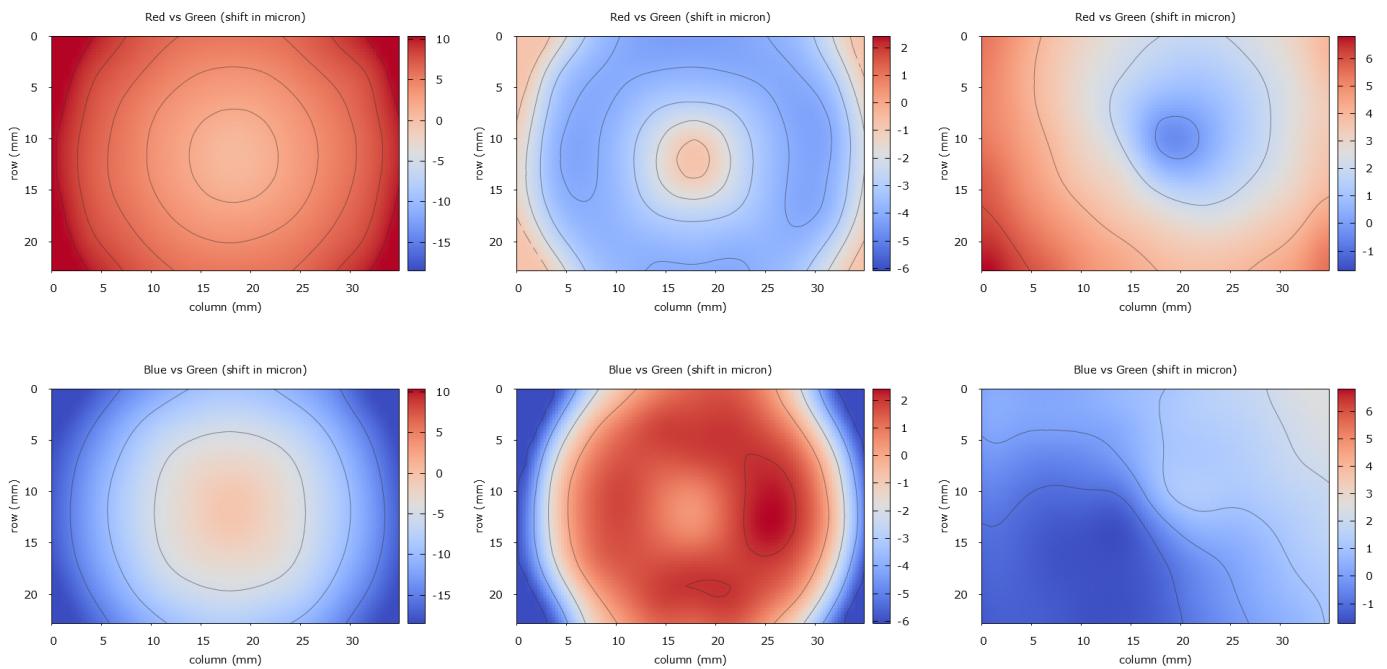


Abbildung 3.6: Links: Zeiss 55 mm; Mitte: Zeiss 50 mm; Rechts: Sony 90 mm. Starke chromatische Aberration beim 55 mm sichtbar. Ähnlich hohe Aberration beim 50 mm und 90 mm, wobei das 90 mm eine gleichmäßige Verteilung aufweist.

Aufgrund der hohen Schärfe und der geringen chromatischen Aberration fällt die Entscheidung auf das Sony 90 mm F2.8 Makro Objektiv.

Anschließend wird geprüft, bei welcher Blende die Kombination aus Kamera und Objektiv die maximale Schärfe besitzt. In Abb. 3.7 ist der Vergleich aus minimaler, optimaler und maximaler Blende zu sehen.

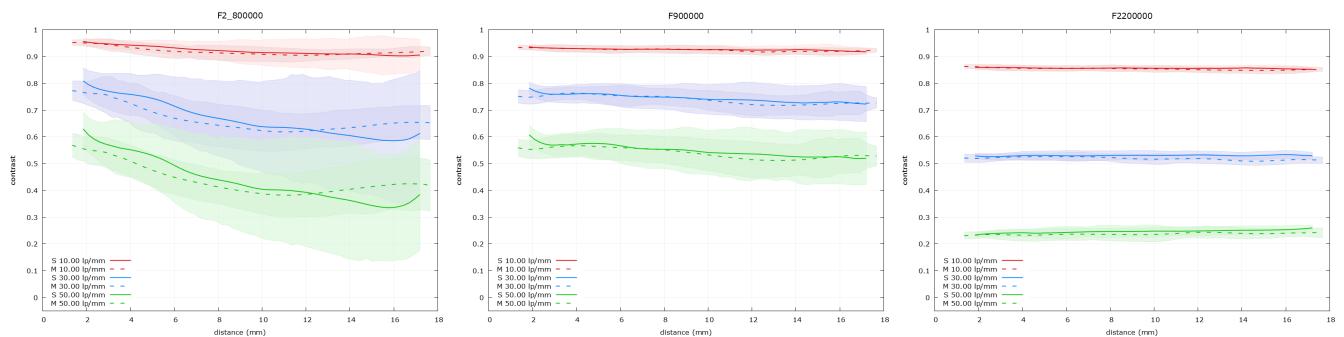


Abbildung 3.7: Links: F2.8 Geringer Kontrast am Bildrand und hohe Standardabweichung; Mitte: F9 Optimaler Kontrast über den gesamten Sensor und geringe Standardabweichung; Rechts: F22 Geringer, aber gleichmäßiger Kontrast über den ganzen Sensor und minimale Standardabweichung.

Bei der Blende von F2.8 nimmt der Kontrast aufgrund der geringen Schärfentiefe schnell ab, da die optimale Fokusebene halbkugelförmig ist (vgl. Abschnitt 2.4.2). Die Mitte ist noch genau im Fokus und in den Ecken liegt die Fokusebene vor dem Test Chart. Bei einer Blende von F22 ist die Schärfentiefe groß, also ist ein weiter Bereich von vorne bis hinten scharf. Deshalb ist der Kontrast in der Mitte und am Rand nahezu identisch. Jedoch ist der Nachteil an dieser großen Schärfentiefe der Effekt der Beugung an der kleinen Blendenöffnung

(vgl. Abschnitt 2.6). Dies hat den insgesamt niedrigeren Kontrast zur Folge. Die optimale MTF besitzt das System bei F9. Hierbei handelt es sich um den Kompromiss aus Schärfentiefe und Beugungseffekten. Es ist ebenfalls möglich, bei einem Test Chart, der 45° angewinkelt zur Sensorebene steht, die MTF über die Bildtiefe aufzutragen, um die Schärfentiefe sichtbar zu machen (Abb. 3.8).

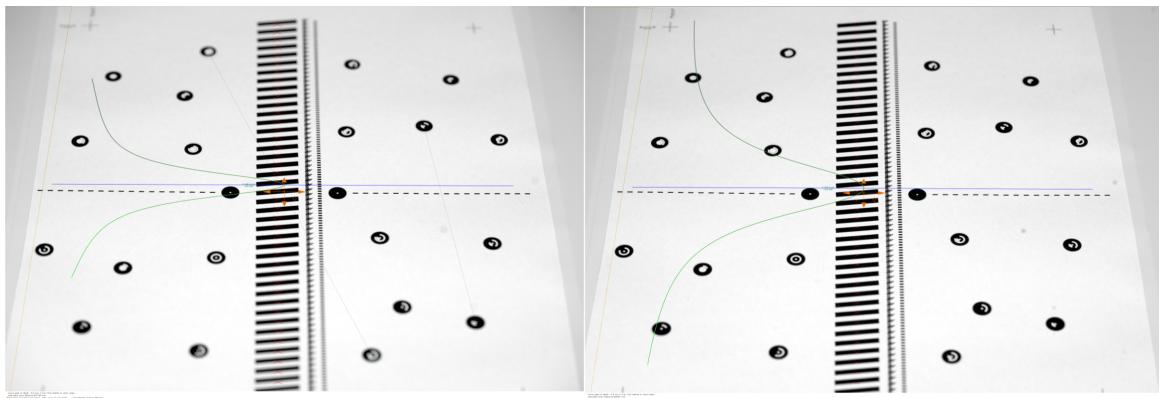


Abbildung 3.8: Links: F5.6 Schmaler Verlauf der MTF mit hohem Peak in der Fokusebene (Blaue Linie) deutet auf eine geringe Schärfentiefe hin; Rechts: F11 Breiterer Verlauf der MTF mit geringerem Peak in der Fokusebene deutet auf eine hohe Schärfentiefe hin.

Zusätzlich ist auch die chromatische Aberration bei F9 mit maximal $0,4 \mu\text{m}$ vergleichsweise gering. Das Gesamtsystem aus Sony Alpha 7R4 und 90 mm F2.8 Makro wird, bei optimaler Blende F9, durch folgende MTF und chromatische Aberration charakterisiert:

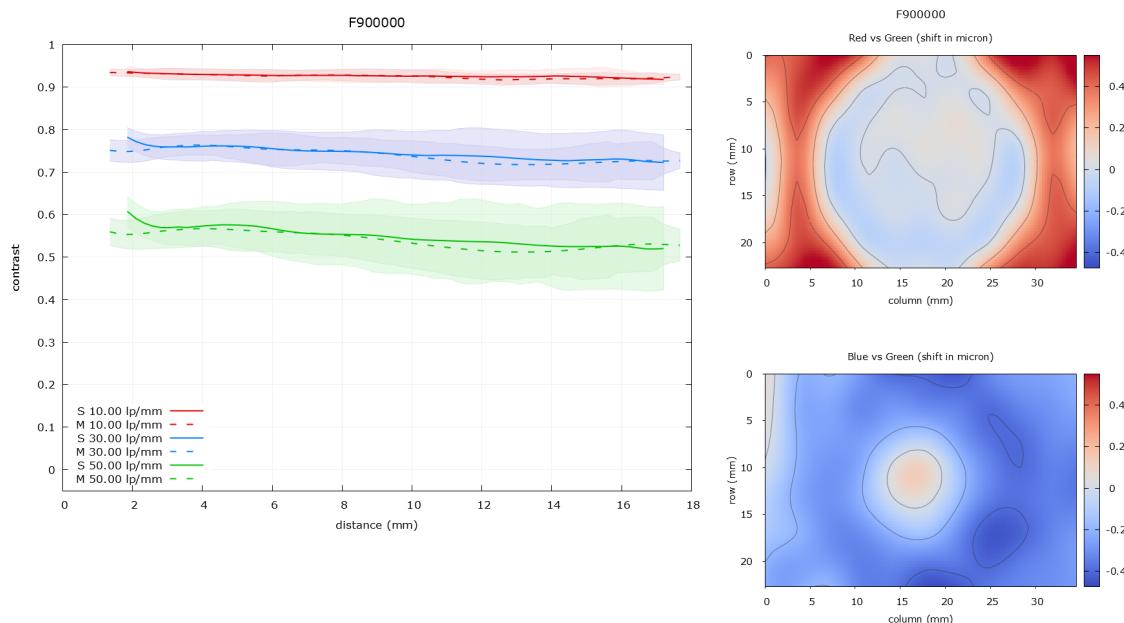


Abbildung 3.9: MTF und chromatische Aberration des final gewählten Systems. Der Kontrast ist von Sensormitte bis zum Rand gleichbleibend hoch und die chromatische Aberration ist gering.

4 Messabweichung entlang der Messkette

Die Messkette des Systems beginnt mit der Information in Weltkoordinaten und endet mit der Position dieser Koordinaten nach der Auswertung der Software. Zuerst wird also ein Bild durch eine Kamera erzeugt. Ein Bild entsteht in einer Digitalkamera nach folgendem Ablauf:

1. Licht aus einer Quelle trifft auf das Objekt;
2. Das Licht wird vom Objekt reflektiert;
3. Das Licht wird durch eine Optik auf den Sensor gelenkt und fokussiert;
4. Der Sensor erzeugt eine diskrete Abtastung des Lichts;
5. Ein Prozessor wandelt die Sensorinformation in eine RAW-Datei;
6. Die Pixel des Rohbildes werden Bayer-Interpoliert und in ein verlustbehaftetes oder verlustfreies Format umgewandelt.

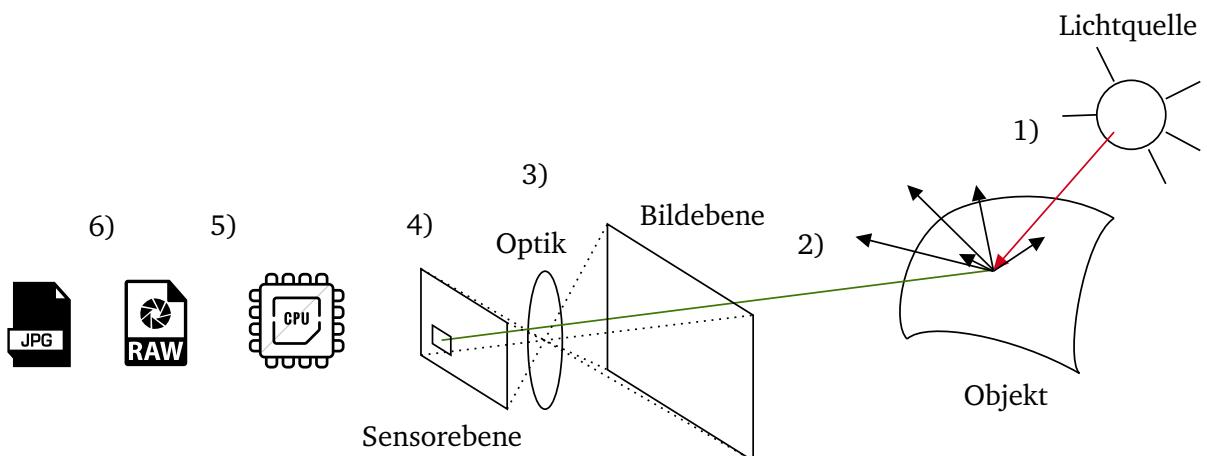


Abbildung 4.1: Licht aus einer Quelle wird am Objekt reflektiert und in der Optik gebündelt auf den Sensor projiziert. Anschließend wird von einem Prozessor ein digitales Rohbild erzeugt und gegebenenfalls in ein komprimiertes Format umgewandelt [51].

Anschließend kann das Bild zur verbesserten Kantenerkennung durch verschiedene Filter nachbearbeitet werden.

In Punkt 1 und Punkt 2 können die Probleme des Schattenwurfs und Streulicht eintreten (vgl. Abschnitt 2.7). Die dabei mögliche Messabweichung ist je nach Situation unterschiedlich, kann jedoch vergleichsweise hoch ausfallen (vgl. Abb. 2.30). Dies ist insbesondere der Fall, wenn der Winkel zwischen Lichtquelle und Optik groß ist. Des Weiteren kann eine zu geringe Beleuchtung zu einem geringen Kontrast führen, wodurch Kanten

nicht mehr erkennbar sind. Bei Messfehlern durch Schattenwurf handelt es sich um eine systematische Messabweichung, die durch richtig gewählte Beleuchtung minimiert werden kann.

In Punkt 3 treten alle in Abschnitt 2.5 erwähnten Effekte auf. Hat eine Optik in Verbindung mit einem Sensor beispielsweise eine optische Auflösung von A_{Opt} [LP/mm], kann eine maximale Abweichung des Messergebnisses F_{opt} entstehen:

$$F_{Opt} = \pm \frac{1}{A_{Opt}} [\text{mm}]. \quad (4.1)$$

Da die Effekte sphärische Aberration, Koma und Astigmatismus letztendlich auch zu einer reduzierten optischen Auflösung führen, sind diese Effekte in dieser Gleichung bereits enthalten. Hierbei handelt es sich um eine zufällige Messabweichung.

Da die chromatische Aberration (CA) in Pixeln angegeben werden kann, ist die maximal auftretende Messabweichung durch sie proportional zur Auflösung des Sensors A in [Pixel/mm] in Weltkoordinaten. Eine chromatische Aberration von c Pixeln kann also eine Messabweichung F_{CA} erzeugen:

$$F_{CA} = \pm \frac{c}{A} [\text{mm}]. \quad (4.2)$$

Hierbei handelt es sich ebenfalls um eine zufällige Messabweichung. Diese beiden zufälligen Messabweichungen können durch richtige Wahl der Blende minimiert werden.

Die relative Messabweichung durch die Verzerrungen F_{Dist} kann folgendermaßen bestimmt werden, wobei ein Punkt P nach P' verschoben wird :

$$F_{Dist} = \frac{P' - P}{P} [\%]. \quad (4.3)$$

Hierbei handelt es sich um eine systematische Messabweichung, die stark von der Entfernung zur Bildmitte abhängt. Da die Verzerrung zu der Kategorie der systematischen Abweichungen gehört, lässt sie sich ebenfalls die bereits erklärte Kalibrierung korrigieren (vgl. Abschnitt 2.2). Diese Korrektur ist jedoch maximal so gut wie das verwendete Kalibriermuster. Der Kalibrieralgorithmus basiert auf der Annahme, dass das Muster in einer Ebene liegt und die Abstände einem idealen Schachbrett entsprechen. Wenn diese Parameter aufgrund von Ungenauigkeiten des Kalibriermusters falsch bestimmt wurden, enthalten anschließend alle Messungen eine bleibende systematische Messabweichung.

Durch eine Vignettierung entsteht ebenfalls ein Kontrastverlust im Randbereich, was wiederum die Kantenerkennung erschwert.

In Punkt 4 findet die diskrete Abtastung durch den Sensor statt. Dadurch kommt es zu einem räumlichen Quantisierungsfehler. Wenn ein Sensor eine Abtastfrequenz von $f_{sampling}$ [Pixel/mm] besitzt, folgt eine maximale Auflösung ΔA_{grenz} von:

$$\Delta A_{grenz} = \frac{1}{2} \cdot K_e \cdot f_{sampling} [\text{pixel/mm}]. \quad (4.4)$$

Somit ergibt sich eine zufällige Messabweichung F_{Res} von:

$$F_{Res} = \pm \frac{1}{\Delta A_{grenz}} [\text{mm}]. \quad (4.5)$$

Außerdem ist zu beachten, dass das Signal der einzelnen Photoelemente des Sensors mit Rauschen überlagert ist (vgl. Abschnitt 2.3), was zu einer zufälligen Messgenauigkeit in der Signalintensität führt. Dadurch kann Kontrast an Kanten verloren gehen.

In Punkt 5 wandelt der Prozessor die Rohdaten des Sensors zu einer RAW-Datei. Anschließend kann diese in Punkt 6 bereits in der Kamera oder am PC in ein komprimiertes Datenformat umgewandelt werden. Die

komprimierten Datenformate können in Verlustfreie und Verlustbehaftete aufgeteilt werden. Eines dieser verlustbehafteten Formate ist beispielsweise das Dateiformat der Joint Photographic Experts Group (JPEG), wobei zusätzlich häufig Kontrast und Sättigung angepasst und nachgeschärft wird. Ein Beispiel für ein verlustfreies Dateiformat ist das Tagged Image File Format (TIFF), welches zwar die Dateigröße leicht reduziert, aber keine Information dabei verliert. Für eine maximale Genauigkeit sollten nur Rohdaten oder verlustfreie Dateiformate verwendet werden. In beiden Fällen gehen aber etwa 30% an Auflösung durch die Bayer-Interpolation verloren (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Da die Objekte in einer Ebene mit einem Referenzobjekt gemessen werden, entsteht zusätzlich eine systematische Messabweichung, wenn das Messobjekt um Δg gegen die Messebene verschoben ist. Diese lässt sich durch Fehlerfortpflanzung von Gleichung (2.28) bestimmen:

$$G = \frac{g - f}{f} \cdot B \quad \Rightarrow \quad \Delta G = \frac{\partial G}{\partial g} \cdot \Delta g \quad \Rightarrow \quad \Delta G = \frac{B}{f} \cdot \Delta g. \quad (4.6)$$

Wenn also ein Objekt mit gemessener Größe B auf dem Sensor beispielsweise um Δg gegenüber der Messebene nach hinten verschoben ist, ist das Objekt eigentlich um ΔG größer als dargestellt.

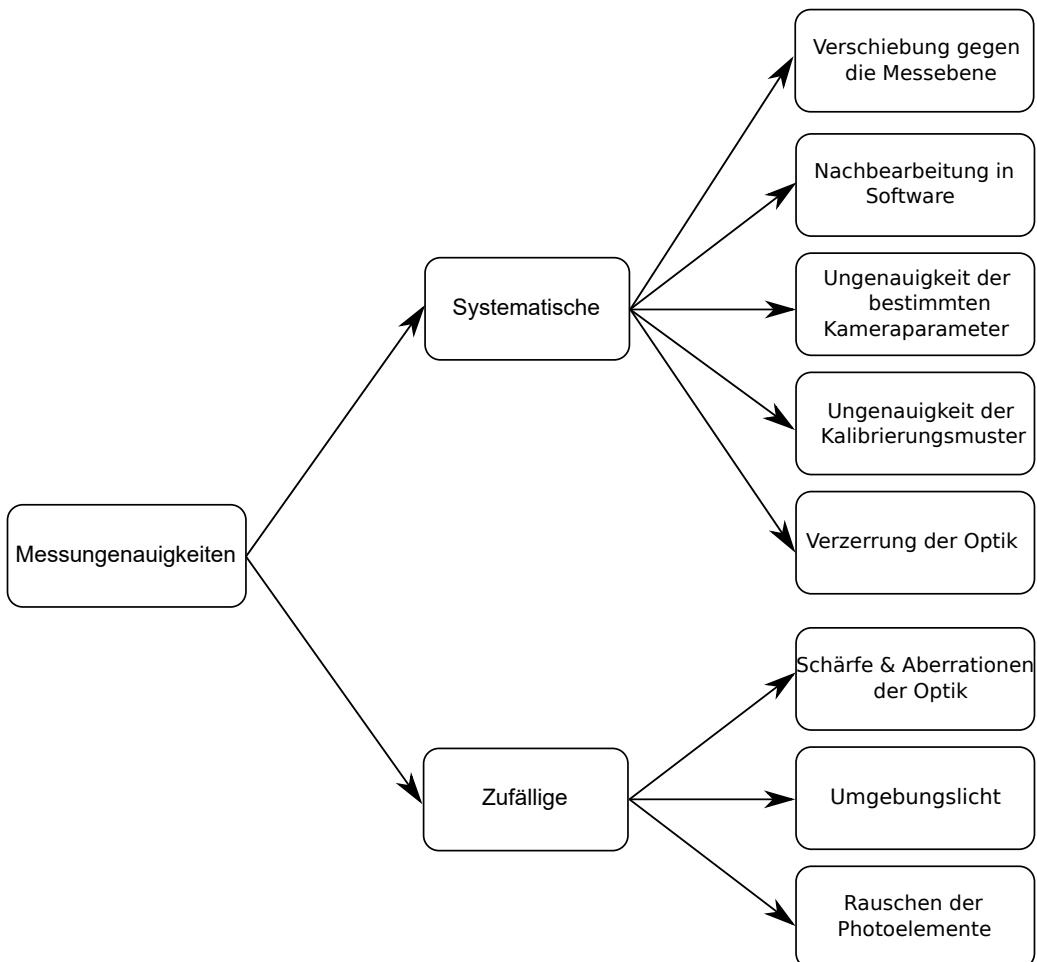


Abbildung 4.2: Übersicht der Messunsicherheiten, die das Messergebnis beeinflussen können. Aufgeteilt in zufällige und systematische Messunsicherheiten.

5 Software

Das Kapitel Software ist in die Bereiche Kalibrierung und Messung aufgeteilt. Die Software basiert auf der Open Source Computer Vision Bibliothek OpenCV. Sie ist für C, C++, Java und Python geschrieben und verfügt über viele Funktionen im Computer Vision Bereich wie Gauß- und Canny Filter sowie Methoden zu Kamerakalibrierung. Zusätzlich sind in ihr einfache Graphical User Interface (GUI) Elemente enthalten, die für die Bedienung der Software verwendbar sind. Als Programmiersprache wird, aufgrund der einfachen Implementierbarkeit, Python gewählt.

5.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung erfolgt nach der von Zhang [6] beschriebenen Methode mittels eines 17x28 Schachbrettes, um auch sehr geringe Verzerrungen gut zu erkennen. Für die Kalibrierung müssen zuerst die inneren Ecken des Kalibrierungsmusters detektiert werden. Dies wird in der Methode `findChessboardCorners()` durch einen „Harris interest point detector“ ermöglicht [52]. Die damit erhaltenen Punkte eignen sich als grobe Lokalisierung der inneren Eckpunkte, welche anschließend mittels eines Subpixel-Optimierungsverfahrens verbessert werden kann [8]. Da der Rechenaufwand für Suchalgorithmen mit der Bildauflösung skaliert, kann dies bei hohen Auflösungen, wie der der Alpha 7R4, lange dauern. Dieses Problem lässt sich durch das Verwenden einer Gaußschen Pyramide beheben [53]. Diese funktioniert, indem das Bild erst auf eine geringere Auflösung herunter skaliert (downsampling) wird und in dem skalierten Bild nach dem Detail gesucht wird (Abb. 5.1). Die gefundene Position wird anschließend als Startpunkt für die Suche in dem Originalbild verwendet. Somit muss nur noch in einem kleinen Umfeld dieses Startpunktes und nicht im gesamten Bild gesucht werden.

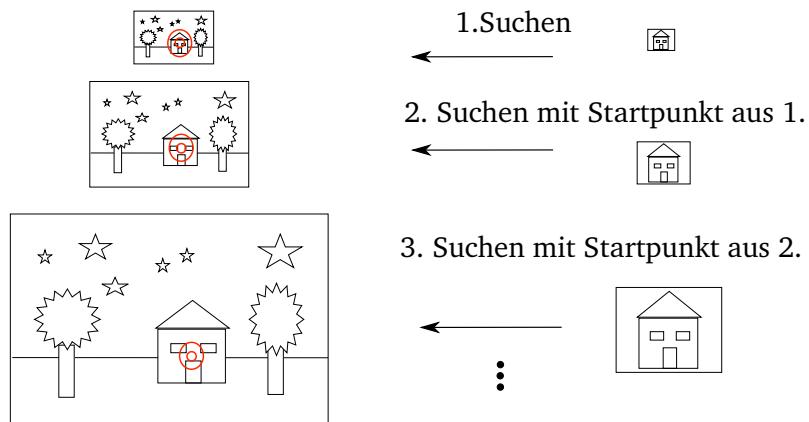


Abbildung 5.1: Bei einer Gauß Pyramide wird das gesuchte Detail, wie beispielsweise die Ecken des Kalibermusters zuerst in einem Bild mit geringerer Auflösung lokalisiert [53].

Downsampling alleine würde jedoch zu Abtastfehlern wie Aliasing und Spiegelfrequenzen führen. Da downsampling wie eine Abtastung funktioniert, muss ebenfalls das Nyquist Abtasttheorem (Gleichung (2.25)) eingehalten werden (Abb. 5.2). Es dürfen in dem Bild, das herunterskaliert werden soll, demnach keine Raumfrequenzen vorkommen, die höher als die halbe Abtastfrequenz sind.

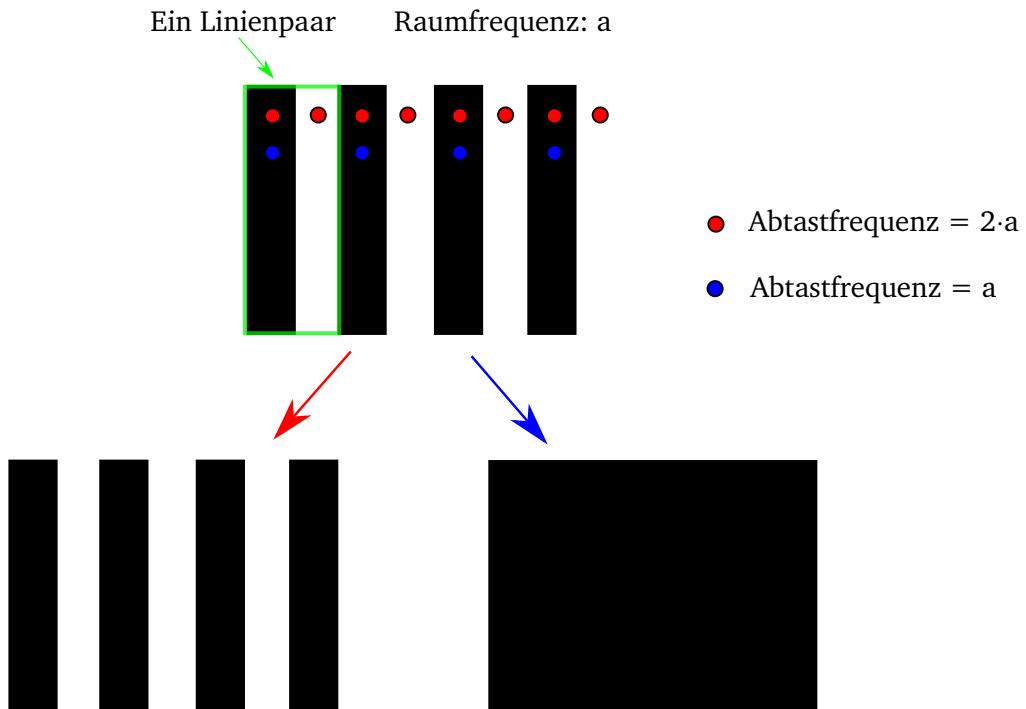


Abbildung 5.2: Raumfrequenzen, die größer als die halbe Abtastfrequenz sind, gehen beim downsampling verloren oder sorgen für Aliasing.

Um Fehler durch Aliasing vorzubeugen, werden i. A. Tiefpassfilter verwendet. In der Raumdomäne ist ein solcher Tiefpass ein Gaußscher Weichzeichner. Scharfe Kanten entsprechen hohen vorkommenden Raumfrequenzen (vgl. Abschnitt 2.6.3). Durch einen Weichzeichner werden diese hohen Raumfrequenzen abgeschnitten. Dieser Prozess aus weichzeichnen, downsampling und lokalisieren kann iterativ wiederholt werden. Die gefundenen Punkte werden im Originalbild anschließend noch auf Subpixelebene mit der Methode cornerSubPix() optimiert. Diese führt eine iterative Verschiebung der detektierten Punkte mittels „gradient decent“ durch [8]. Der gradient decent Algorithmus funktioniert folgendermaßen:

1. Ein Startpunkt x_0 für eine Ecke wurde durch die Methode findChessboardCorners() gefunden;
2. Es wird ein Rechteck aus $n \times n$ Pixel um den gefundenen Punkt gebildet und berechnet den Gradienten in diesem Bereich $h_k = -\nabla I(x_k)$, wobei $I(u, v)$ der entsprechende Grayscale des Pixels ist (Abb. 5.3);
3. Die Schrittweite t_k wird mittels linesearch ermittelt: $\min_{t_k > 0} I(x_k + t_k \cdot h_k)$;
4. $x_{k+1} = x_k + t_k \cdot h_k$;
5. Abbrechen, wenn die Verbesserung klein wird: $|I(x_{k+1}) - I(x_k)| \leq \epsilon$ oder eine maximale Anzahl an Iterationen N erreicht ist.

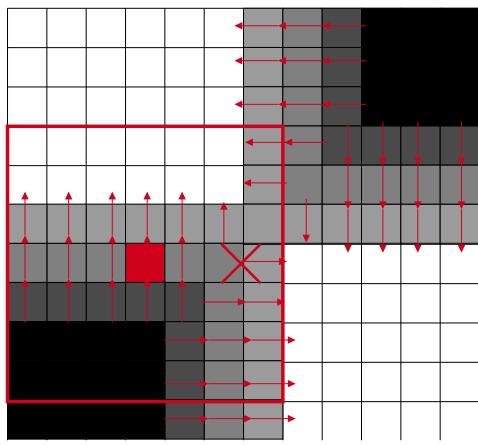


Abbildung 5.3: Die Methode `cornerSubpix()` nutzt gradient decent, um die Position der detektierten Eckpunkte auf subpixel Ebene zu verbessern. Dafür wird der Gradient in einem $n \times n$ Fenster um den Startpunkt gebildet, um die Richtung der optimalen Verschiebung zu bestimmen [51].

Anschließend werden die detektierten Eckpunkte in dem Bild markiert (Abb. 5.4).

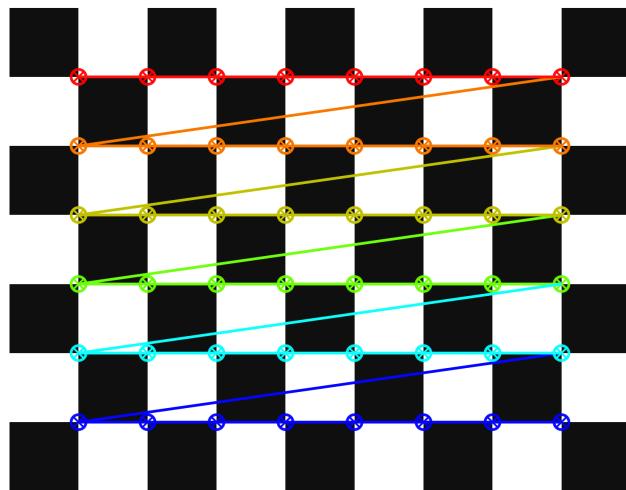


Abbildung 5.4: Detektionierte Eckpunkte werden nach der Subpixel Optimierung im Bild markiert. Dies ermöglicht die Kontrolle über den Erfolg der Detektion.

Alle detektierten Punkte (Bildkoordinaten) werden in einer Liste gespeichert und anschließend wird durch die Methode `calibrateCamera()` die Kameraparameter bestimmt. Die Weltkoordinaten werden nach Zhangs Methode als ein 2D Array aus Punkten modelliert. Anschließend kann mit Gleichung (2.23) der durchschnittliche Reprojection Error nach der Kalibrierung berechnet werden.

Ein wesentlicher Aspekt, der die Qualität der Kalibrierung beeinflusst, ist die Anzahl an verwendeten Bildern, welche nötig ist, bis die Parameter durch den Levenberg-Marquardt Algorithmus zu ihrem Endwert konvergieren. Dafür kann nach jedem Bild die Methode `calibrateCamera()` aufgerufen werden, um die Kamera mit den bis dahin gesammelten Korrespondenzen zu kalibrieren. Anschließend wird der durchschnittliche Reprojection Error berechnet. Nun kann der Reprojection Error gegenüber der Anzahl der Bilder aufgetragen werden, um die Anzahl an benötigten Bildern zu prüfen.

5.2 Messung

Für eine Messung in einem Bild wird eine Referenz mit bekannter Größe benötigt. Dafür eignen sich beispielsweise AruCo Marker, welche sich leicht lokalisieren lassen [54]. Ein AruCo Marker ist ein rechteckiger schwarzer Marker mit einer inneren binär Matrix, die seine ID repräsentiert (Abb. 5.5). Sie werden häufig in der Ausrichtungserkennung von Objekten verwendet [51].

Zuerst wird das zu vermessende Bild mittels der internen Kameraparameter K und D kalibriert und entzerrt. Anschließend wird der AruCo Marker in dem entzerrten Bild detektiert und die Koordinaten seiner Eckpunkte gespeichert. Da die Eckpunkte in unbekannter Reihenfolge vorliegen, werden sie anhand ihrer Position im Bild sortiert. Beispielsweise muss der Betrag der unteren rechten Ecke $|(\bar{x}_{br}, \bar{y}_{br})|$ am größten und der Betrag der oberen linken Ecke $|(\bar{x}_{tl}, \bar{y}_{tl})|$ am kleinsten sein. Dabei liegt der Nullpunkt oben Links in einem Bild. Die untere linke Ecke $(\bar{x}_{bl}, \bar{y}_{bl})$ lässt sich von der oberen rechten $(\bar{x}_{tr}, \bar{y}_{tr})$ unterscheiden, indem die Differenz der verbleibenden Punkte betrachtet wird.

Nun kann mit dieser Information die Seitenlänge des Markers in Pixeln mit Hilfe der euklidischer Distanz bestimmt werden. Mit der gemessenen Seitenlänge in Pixeln und der bekannten Seitenlänge des Markers in mm lässt sich nun das Verhältnis aus Pixeln pro mm in der Messebene bilden.

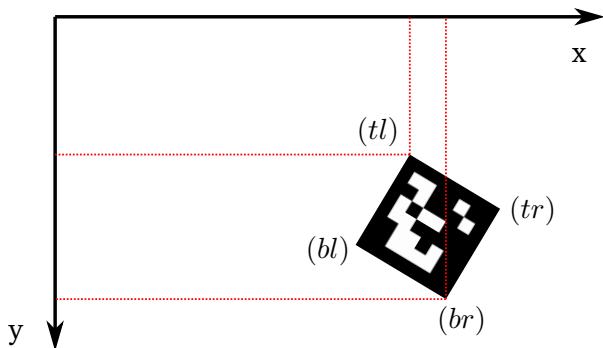


Abbildung 5.5: Marker mit ID 3 aus dem 6x6-250 AruCo dictionary. Der AruCo Marker besteht aus einem äußeren schwarzen Rechteck und einer inneren binär codierten ID.

Aus Gleichung (2.28) kann ebenfalls die Distanz zum Marker bestimmt werden. Somit lässt sich auch nachträglich noch angeben, in welcher Entfernung die Messung stattgefunden hat.

Anschließend wird der Bereich, in dem gemessen werden soll, mit einer ROI markiert und ausgeschnitten. Nun besteht die Möglichkeit, manuell Messpunkte auszuwählen (Abb. 5.10). Danach wird über das Pixel/Längen Verhältnis die Distanz bestimmt. Die Messpunkte, Verbindungsstrecke und gemessene Distanz werden auf dem Bild markiert und in einer CSV-Datei gespeichert. Die Genauigkeit dieser Art der Messung wird jedoch durch den menschlichen Faktor beschränkt. Aus diesem Grund besteht zusätzlich die Möglichkeit, über einen Kantenerkennungsfilter die Objektkanten automatisch zu erkennen und zu vermessen.

Einer dieser Filter ist der Canny Edge Detector [55], welcher unter den Rahmenbedingungen von ausschließlich linearer Filterung und unabhängig identisch verteiltem Rauschen, den optimalen Filter zur Erkennung von Kanten darstellt [11].

Kantenerkennungsfilter funktionieren, indem sie den Gradienten über das Bild berechnen. Da an Kanten eine hohe Änderung der Pixelwerte stattfindet, ist demnach auch der Betrag des Gradienten hoch.

In Abb. 5.6 ist ein Bild einer Kante zu sehen, an welcher der Gradient ausgewertet wird. Der Gradient an Punkt (x_0, y_0) steht senkrecht auf der Kante, da dies die Richtung der stärksten Änderung von $I(x, y)$ ist. Der Betrag des Gradienten ist proportional zur Stärke dieser Änderung.

In Abb. 5.6 ist die beispielhafte Auswertung des Gradienten am Punkt (x_0, y_0) zu sehen.

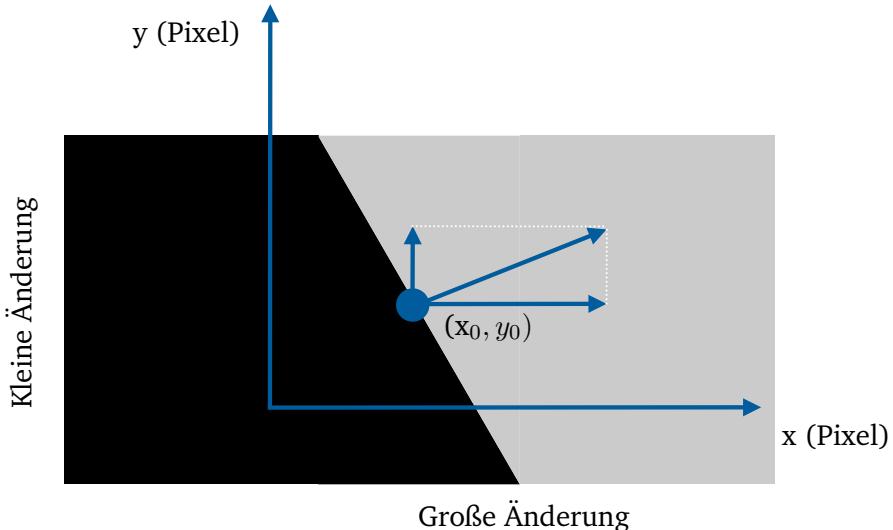


Abbildung 5.6: Über den Koordinaten des Bildes wird die Intensitätsfunktion $I(x, y)$ aufgetragen. Der Gradient steht senkrecht zur Kante, da dies die Richtung des größten Anstiegs ist [53].

Der Gradient ∇I an Position (x_0, y_0) ist definiert als:

$$\nabla I = (I_x(x_0, y_0), I_y(x_0, y_0)) = \left(\frac{\partial I(x_0, y_0)}{\partial x}, \frac{\partial I(x_0, y_0)}{\partial y} \right). \quad (5.1)$$

Der Betrag $||\nabla I||$ und Winkel Θ des Gradienten sind:

$$||\nabla I|| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad \Theta = \arctan\left(\frac{I_y}{I_x}\right). \quad (5.2)$$

Wenn nun zusätzlich die 2. Ableitung berechnet wird, ergeben sich die Kanten als die Nullstellen der 2. Ableitung. In Abb. 5.7 ist die erste und zweite räumliche Ableitung der Intensitätsfunktion, $\frac{\partial I}{\partial x}$ und $\frac{\partial^2 I}{\partial x^2}$ einer realen Kante zu sehen. Dabei ist zur Anschaulichkeit nur die x Koordinate betrachtet.

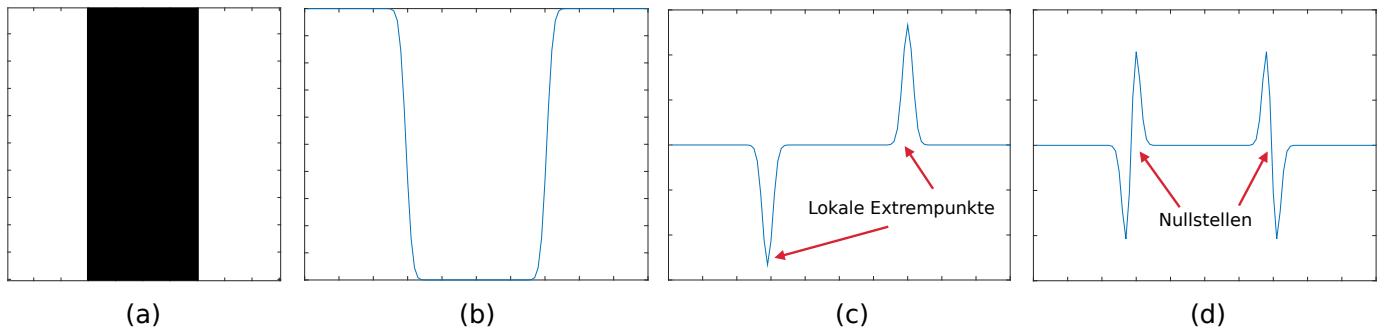


Abbildung 5.7: Als Erstes wird aus dem Bild einer realen Kante (a) die Intensitätsfunktion $I(x)$ gebildet (b). Nach dem ersten Ableiten $\frac{\partial I}{\partial x}$ der Intensitätsfunktion ergeben sich die Position der Kanten als lokale Extrempunkte (c). Nach der 2. Ableitung $\frac{\partial^2 I}{\partial x^2}$ ist es möglich, die Kanten als Nullstellen zu detektieren (d) [11].

Jedoch treten hohe Werte für $\|\nabla I\|$ auch bei Bildrauschen auf. Dem kann wieder mit einem Gaußfilter entgegengewirkt werden (Abb. 5.8).

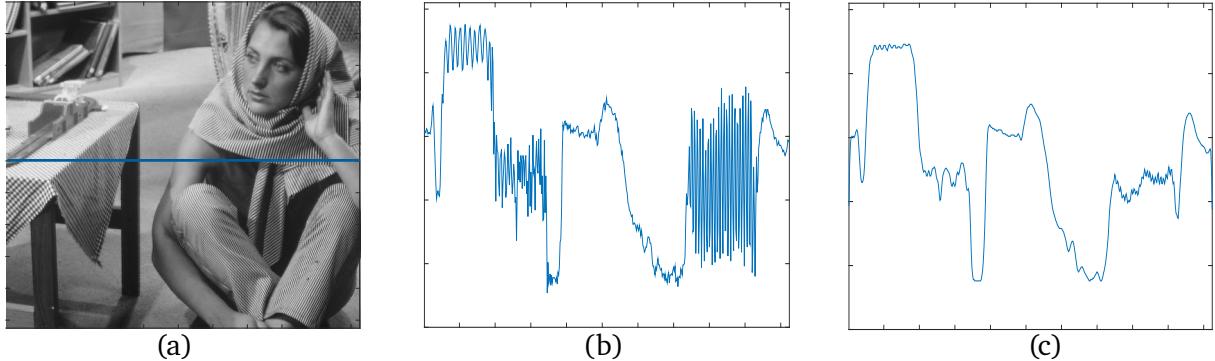


Abbildung 5.8: (a) Eine Zeile aus einem Bild; (b) Grayscale $I(x)$ eines Bildes entlang einer Zeile; (c) Die gleiche Zeile, nachdem das Bild mit einem Gaußfilter überlagert wurde. Rauschen und relevante Kanten lassen sich nun in der Ableitung besser unterscheiden [11].

Der Gaußfilter verbessert die Differenzierung zwischen Kanten und Noise, verwäscht die Kanten aber auch, wodurch die Qualität der Lokalisierung reduziert wird.

Zusätzlich verwendet der Canny Edge Detector eine Hysterese aus 2 Grenzwerten $Canny_{Low}$ und $Canny_{High}$, um eine Kante auch dann zu erkennen, wenn sie nicht komplett über dem ersten Grenzwert liegt. So werden Pixel auch als Kante erkannt, wenn sie:

1. Einen Betrag des Gradienten größer als $Canny_{Low}$ besitzen;
2. Mit einem Pixel verbunden sind, der einen Betrag des Gradienten größer als $Canny_{High}$ besitzt.

Beide Bedingungen müssen erfüllt sein. Außerdem müssen die Parameter $Canny_{Low}$ und $Canny_{High}$ individuell auf die Situation angepasst werden.

In Abb. 5.9 ist der Effekt der Hysterese erkennbar. Mit einem festen Grenzwert sind die Kanten in kontrastarmen Bereichen unterbrochen und können nicht als zusammenhängende Kontur erkannt werden.

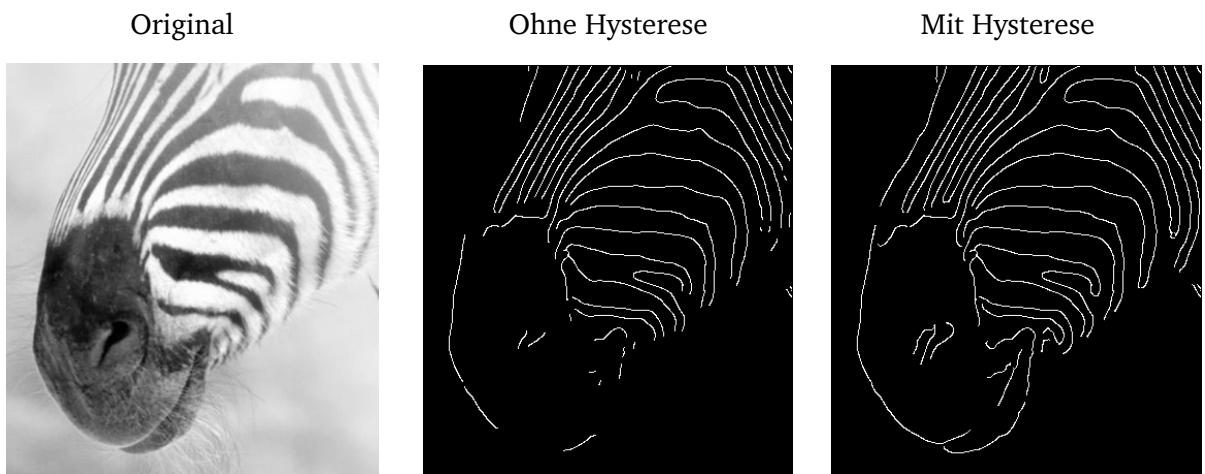
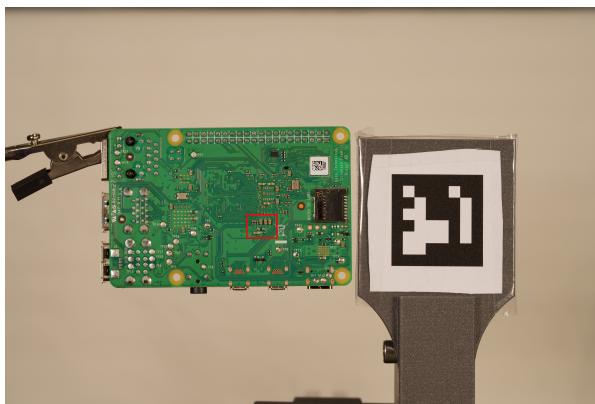


Abbildung 5.9: Ohne die Hysterese werden geschlossene Kanten unterbrochen, wenn ihr Gradient unter einen festen Grenzwert fällt. Mit der Hysterese wird ein Pixel ebenfalls als Kante gewertet, wenn er noch über $Canny_{Low}$ liegt und mit einem Pixel mit Gradienten über $Canny_{High}$ verbunden ist [11].

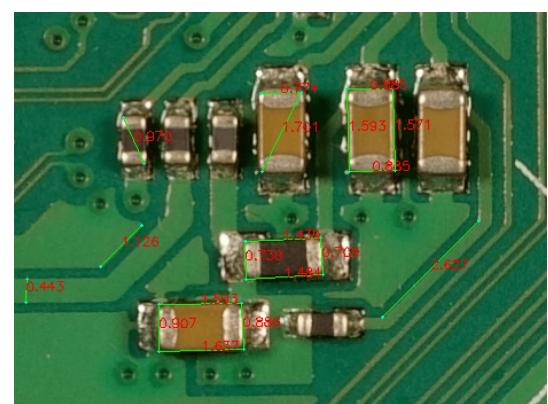
Nachdem die Kanten mittels des Canny Edge Detectors gefunden wurden, kann mit der Methode `findContours()` geschlossene Kanten als Konturen erkannt werden. Durch das Bestimmen der Fläche, können kleine Konturen herausgefiltert werden, um Rauschen zu reduzieren.

Anschließend werden die Konturen durch Polygone genähert, dessen Kantenlängen nun gemessen werden können. Dabei ist der Grad der Näherung abhängig von ϵ , welches die maximale Distanz zwischen der Kontur und der Näherung angibt. Wenn beispielsweise ein rechteckiges Objekt vermessen werden soll, dessen Ecken nicht ideal, sondern abgerundet sind, kann ein höheres ϵ gewählt werden.

Die maximale Abweichung ϵ , Anzahl an Gaußfiltern $n_{Gau\beta}$ sowie die minimale Konturfläche A_{min} sind ebenfalls Parameter, die eingestellt werden müssen. Für alle Parameter stehen entsprechende Schieberegler in der GUI zur Verfügung. Der Vorteil dieser Methode ist, dass es keinen direkten menschlichen Faktor beim Lokalisieren einer Kante gibt und die Ergebnisse somit genauer und reproduzierbarer werden (Abb. 5.11). Der Nachteil ist, dass insbesondere Kanten mit geringem Kontrast nicht immer zuverlässig detektiert werden.

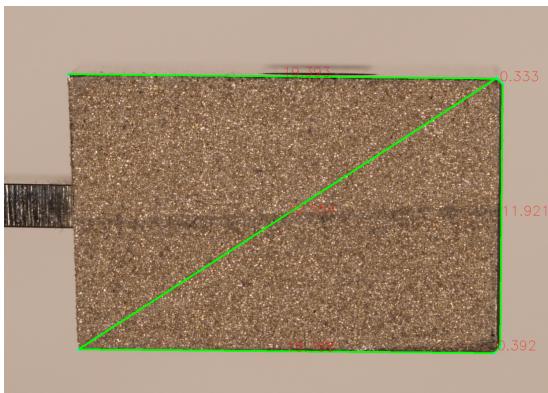


(a) Auswahl der ROI

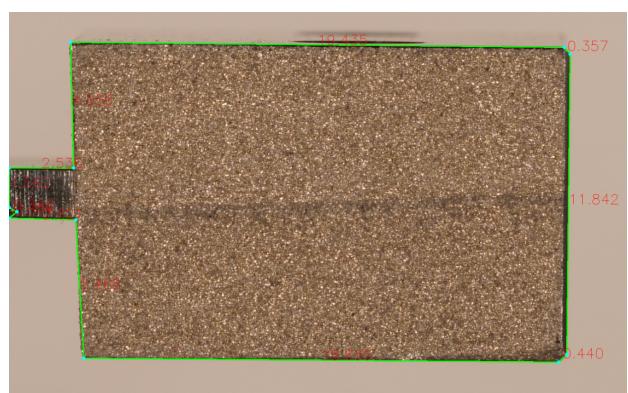


(b) Vermessung von Bauteilen

Abbildung 5.10: Vermessung einer Platine. Eine ROI wird gewählt(a) und anschließend werden beliebige Strecken manuell vermessen(b). Die Länge der Kanten wird in mm auf das Bild geschrieben.



(a) manuelle Messung



(b) automatische Messung

Abbildung 5.11: Vermessung eines additiv gefertigten Verformungskörpers [56] mit der manuellen und automatischen Messmethode. Mit der manuellen Methode ist es möglich, beliebige Strecken auch ohne Objektkante zu messen(a). Mit der automatischen Methode werden nur Kanten erkannt und gemessen(b). Es wurde ein geringes ϵ gewählt um die Abflachung der Ecken, rechts im Bild, ebenfalls zu erkennen.

6 Ergebnisse und Diskussion

In dem folgendem Kapitel erfolgt die Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Kalibrierung sowie die Charakterisierung der Genauigkeit des Systems.

6.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung wird als Erstes mit einem auf Papier gedruckten Muster erstellt, das auf eine Holzlatte geklebt wird. Anschließend wird zum Vergleich ein Kalibriermuster aus Aluminium [57] verwendet.

Es werden mehrere Kalibrierungen durchgeführt und der Reprojection Error berechnet, um die Mindestanzahl an nötigen Bildern aus Abschnitt 5.1 zu bestimmen. Es ist zu beobachten, dass immer ein Noise Floor besteht, gegen den der Reprojection Error konvergiert (Abb. 6.1). Dies kann aufgrund von Rauschen in den Datenpunkten und minimalen systematischen Fehlern der Kalibriermuster der Fall sein.

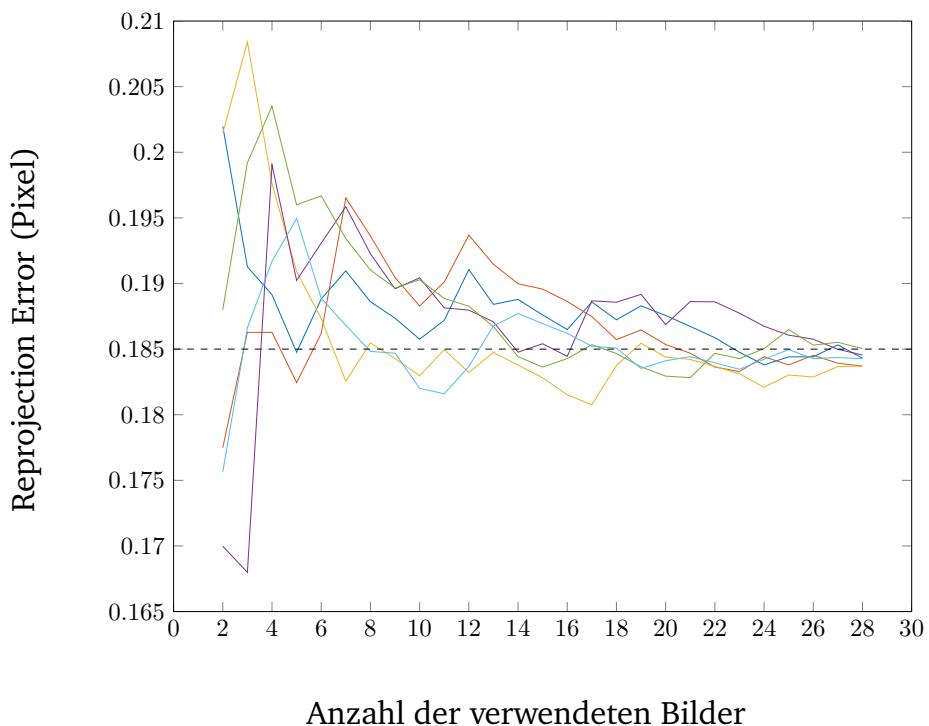


Abbildung 6.1: Verlauf des Reprojection Errors von mehreren Kalibrierungen (verschiedene Farben). Je mehr Bilder für die Kalibrierung verwendet werden, desto geringer der Reprojection Error. Es gibt jedoch gerade am Anfang bei wenig Bildern einige Ausreißer. Dies kann passieren, wenn die ersten paar Bilder der Kalibrierung sehr ähnlich sind und wenig zusätzliche Information für den Algorithmus enthalten.

Der Reprojection Error bei der Kalibrierung mit dem Papier Kalibriermuster konvergiert nach etwa 20 Bildern und schwankt in einem Bereich von $\pm 0,005$ Pixel oder 27% um den durchschnittlichen bleibenden Fehler von 0,185 Pixel. Wenn der durchschnittliche Reprojection Error ohne Kalibrierung berechnet wird, ergibt sich ein Fehler von etwa 0,8 Pixel. Dies entspricht einer Verbesserung von etwa 76% durch die Kalibrierung.

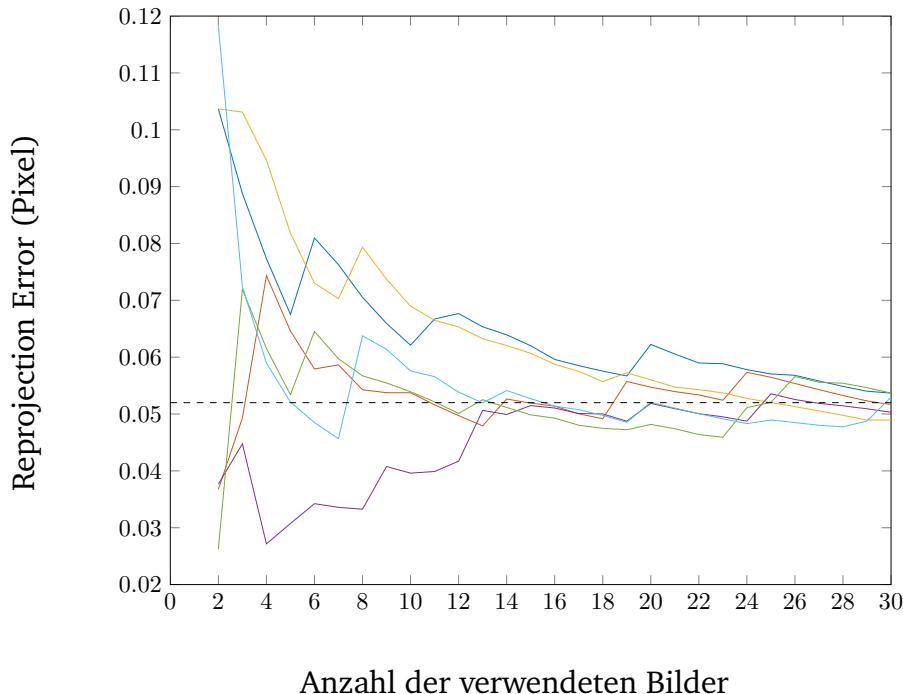


Abbildung 6.2: Auch bei der Kalibrierung mittels des Aluminium Kalibriermuster ist zu sehen, dass der Reprojection Error gegen einen Noise Floor von 0,052 Pixel konvergiert. In einer repräsentativen Auswahl an Verläufen sind ebenfalls Ausreißer sichtbar, bei denen möglicherweise die ersten Bilder zu ähnlich waren und zu einem fälschlich gering gemessenem Fehler führen.

Der Reprojection Error bei der Kalibrierung mit dem Kalibrermuster auf Aluminium (Abb. 6.2) konvergiert nach etwa 24 Bildern und schwankt in einem Bereich von $\pm 0,013$ Pixel oder 25% um den bleibenden durchschnittlichen Fehler von 0,052 Pixel. Der bleibende Fehler ist hierbei also um Faktor 3,5 geringer als beim Papiermuster. Wenn der durchschnittliche Reprojection Error ohne Kalibrierung berechnet wird, ergibt sich ein Fehler von etwa 0,4 Pixel. Der Fehler ist hierbei auch ohne die Kalibrierung schon geringer, da das Aluminium Kalibriermuster vermutlich insgesamt eher dem idealen Schachbrett entspricht. Da das Papiermuster ohnehin weniger dem Ideal entspricht, aufgrund der begrenzter Fertigungsqualität eines Druckers, hat es auch vor der Kalibrierung schon einen höheren Reprojection Error. Die Verbesserung des Reprojection Errors durch die Kalibrierung entspricht beim Aluminium Kalibriermuster etwa 87%.

Die Kalibrierung mittels Aluminium Kalibriermuster ist also besser im Minimieren des Reprojection Errors als die Kalibrierung mittels eines aus Papier gedruckten Musters. Außerdem ist ersichtlich, dass die unterschiedlichen Bilder und deren Reihenfolge großen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Minimierung des Reprojection Errors haben. Da es sich hierbei nur um durchschnittliche Fehler handelt, lassen sich keine Aussagen über den maximal auftretenden Fehler oder die Verteilung über den Sensorbereich treffen. Dies ist jedoch möglich, wenn der Reprojection Error in Bezug zum Sensorbereichs aufgetragen wird.

In den nachfolgenden Messungen wird ausschließlich das Aluminium Kalibriermuster verwendet.

In Abb. 6.3 ist der Reprojection Error vor der Kalibrierung dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Fehler in radialer Richtung zunimmt. Der Fehler beträgt im Maximum 50,47 Pixel.

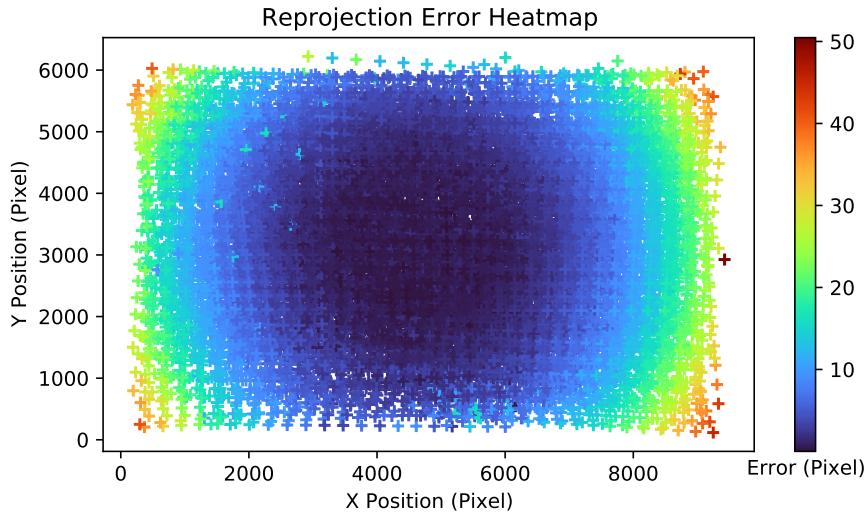


Abbildung 6.3: Anhand des radial zunehmenden Fehlers ist eine hauptsächlich radiale Verzerrung erkennbar.
Der Fehler beträgt im Maximum bis zu 50,47 Pixel.

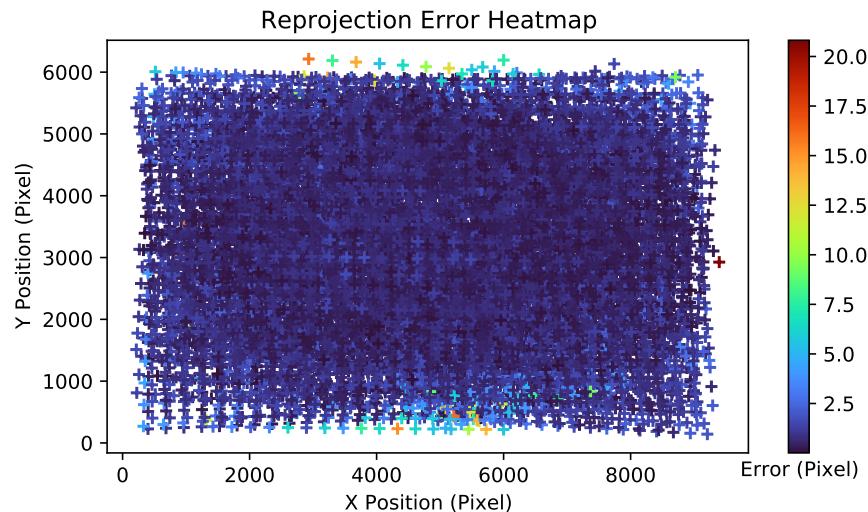


Abbildung 6.4: Nach der Kalibrierung ist der durchschnittliche Fehler 87% geringer und gleichmäßiger verteilt.
Der maximale Fehler ist mit 20,82 Pixel auch geringer.

In Abb. 6.4 ist der Reprojection Error nach der Kalibrierung mittels des Aluminium Kalibermusters dargestellt. Es ist ein geringerer und gleichmäßig verteilter Fehler nach der Kalibrierung erkennbar. Der maximal auftretende Fehler ist in diesem Fall ebenfalls geringer. Die durchschnittliche Messabweichung beträgt nach der Kalibrierung 0,052 Pixel, was durch Gleichung (4.5) in mm umgerechnet werden kann. Bei einem hier betrachteten FOV von 30 cm x 20 cm ergibt sich eine durchschnittliche Messabweichung von $\pm 1,65 \mu\text{m}$, die durch die bleibende Verzerrung hervorgerufen wird. Bei der maximalen Messabweichung von 20,82 Pixel beträgt die Abweichung $\pm 657,2 \mu\text{m}$. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, n unabhängige Kalibrierungen durchzuführen und die Ergebnisse zu mitteln, um die Schwankung zu reduzieren.

Aus mehreren Kalibrierungen lässt sich mittels des Estimation Errors (Gleichung (2.24)) und einem gewähltem Konfidenzintervall eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse treffen.

Es werden $n = 5$ Kalibrierungen mit jeweils 24 Bildern durchgeführt und das 95% Konfidenzintervall nach Gleichung (2.24) bestimmt. Daraus ergeben sich folgende Parameter:

Tabelle 6.1: Ermittelte Kameraparameter(Pixel) nach $n = 5$ Kalibrierungen.

Parameter	Mittelwert (Pixel)	95%-Kofidenzintervall (Pixel)
f_x	27541,73	70,78
f_y	27531,16	66,44
x_0	4511,54	47,40
y_0	3076,29	31,38

Der Punkt (x_0, y_0) ist etwa in der Sensormitte und die richtungsbezogenen Brennweiten f_x und f_y sind ähnlich groß, wie es erwartet wird. Bei einer effektiven Sensorbreite von 35,68mm (X_{eff}) und Pixelzahl (P_{eff}) von 9504 Pixel [58] ergibt sich eine tatsächlich effektive Brennweite des Systems von:

$$f_{\text{eff}} = \frac{X_{\text{eff}}}{P_{\text{eff}}} \cdot f_x = 103,3 \text{ mm} \pm 1,3 \text{ mm}. \quad (6.1)$$

Dieser Wert ist größer als die angegebenen 90 mm des Objektives. Dies kann daran liegen, dass f_x abhängig vom eingestellten Fokus ist (vgl Abb. 2.12). Die vom Hersteller angegebene Brennweite eines Objektives ist die für einen Fokus für $g = \infty$. Dadurch kann f_{eff} jedoch nur kleiner ausfallen und der beobachtete Effekt nicht erklärt werden. Zusätzlich ist die Angabe der Brennweite von Objektiven auf das Vollformat normiert. Bei einem 25,1 mm x 16,7 mm APS-C Sensor würde die äquivalente Brennweite dieses Objektives beispielsweise 135 mm betragen [59]. Dadurch kann die größere Brennweite eventuell erklärt werden.

Die Verzerrungsparameter des Brown-Conrady-Modells ergeben sich zu:

Tabelle 6.2: Ermittelte Verzerrungsparameter nach $n = 5$ Kalibrierungen.

Parameter	Mittelwert	95%-Kofidenzintervall
k_1	-0,191409	0,013185
k_2	0,130293	0,351864
p_1	-99.55×10^{-6}	30.12×10^{-6}
p_2	218.34×10^{-6}	120.86×10^{-6}
k_3	-0,860778	0,689461

Anhand der Verzerrungsparameter ist zu erkennen, dass hauptsächlich radiale Verzerrungen auftreten. Aufgrund von $k_1 < 0$ kann erkannt werden, dass es sich um eine pincushion distortion (vgl. Abschnitt 2.5.6) handelt [16]. Die tangentialen Verzerrungen sind im Vergleich zu den radialen Verzerrungen geringer.

Es gibt zusätzlich noch einige weitere Faktoren, die Einfluss auf die Qualität der Kalibrierung haben können, wie beispielsweise die verwendeten Subpixel-Optimierungsparameter [8], welche in dieser Arbeit nicht untersucht werden.

6.2 Messung

Um die Genauigkeit der Messung beurteilen zu können, wird eine Referenz mit bekannter Größe benötigt. Dafür eignet sich beispielsweise das USAF-1951 Target aus Glas. Die Raumfrequenz (R) eines Elements lässt sich nach folgender Formel bestimmen:

$$R = 2^{(G_N + \frac{E_N - 1}{6})} [\text{LP/mm}], \quad (6.2)$$

wobei G_N die Gruppennummer und E_N die Elementnummer ist.

In Tabelle 6.3 sind die Raumfrequenzen der entsprechenden Linienpaar-Elemente zu sehen. Die Linienpaare können mittels des automatischen Modus aus Abschnitt 5.2 vermessen und mit ihrem Sollwert verglichen werden. Durch eine 3D-gedruckte Halterung wird erreicht, dass das USAF Target und der AruCO Marker in einer Ebene liegen (Abb. 6.5). Die Messung wird mittig im Bildbereich durchgeführt. In jeder USAF Gruppe stehen 6 horizontale und 6 vertikale Kanten zum Messen zur Verfügung. Jede Messung wird 2-mal wiederholt, wodurch sich eine Anzahl von $n = 12$ Messungen ergibt. Es werden verschiedene WD vermessen, um unterschiedliche Anwendungen abzubilden, die verschiedene FOVs benötigen. Die Fehlerbalken der nachfolgenden Messungen entsprechen dem 95% Konfidenzintervall.

Tabelle 6.3: Gruppen- und Elementnummern des USAF 1951-Targets mit dazu gehöriger Raumfrequenz R .

E_N	R (LP/mm)							
	G_N							
Nr.	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	32,0	64,0	128
2	1,12	2,24	4,49	8,98	17,95	36,0	71,8	144
3	1,26	2,52	5,04	10,10	20,16	40,3	80,6	161
4	1,41	2,83	5,66	11,30	22,62	45,3	90,5	181
5	1,59	3,17	6,35	12,70	25,39	50,8	102,0	203
6	1,78	3,56	7,13	14,30	28,51	57,0	114,0	228



Abbildung 6.5: CAD Modell der 3D gedruckten Halterung für das USAF-1951 Target.

In Abb. 6.6 sind die Messergebnisse bei einer WD von 81 cm zu sehen. Dabei besteht ein FOV von etwa 28 cm x 18,5 cm. Die gemessene Breite der USAF-Lieneinpaare wird gegenüber der Raumfrequenz aufgetragen. Die Abweichung des Messwerts vom Sollwert nimmt mit steigender Raumfrequenz zu. Die Abweichung beträgt bei geringen Frequenzen bis 2,2 LP/mm unter 9%, steigt aber bei höheren Frequenzen bis zu 14,5%. Die maximal detektierbare Frequenz liegt bei 4,5 LP/mm, was einer Auflösung des Systems von 0,222 mm entspricht.

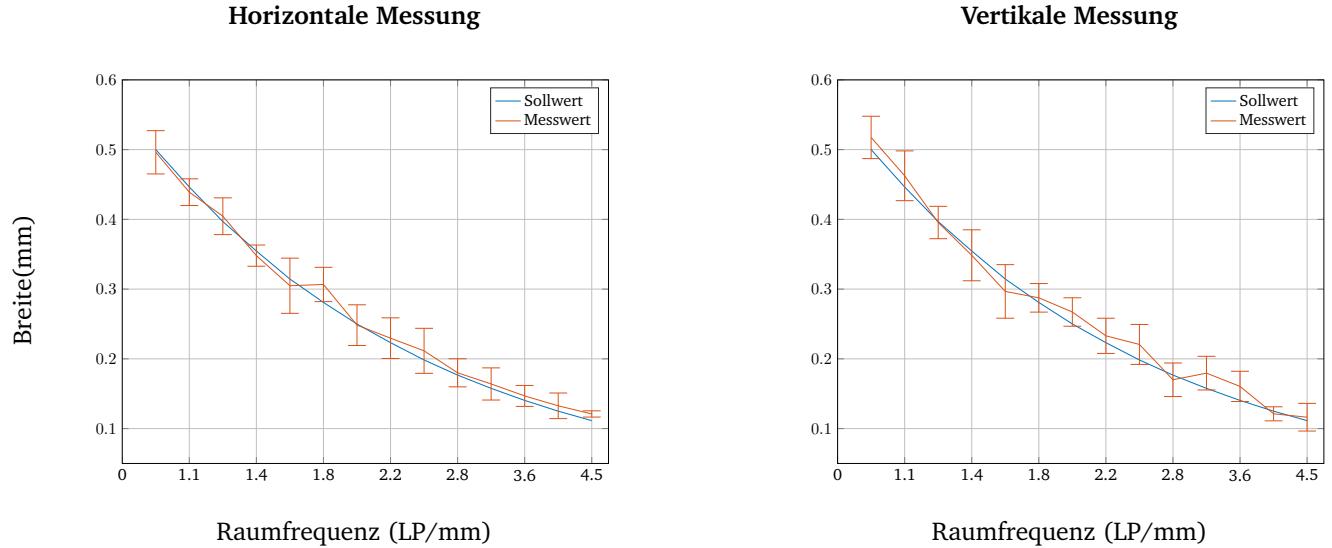


Abbildung 6.6: Messung bei einer Entfernung von 81 cm. Arbeitsbereich 28 cm x 18,5 cm.

In Abb. 6.7 sind die Messergebnisse bei einer WD von 55 cm zu sehen. Dabei besteht ein FOV von etwa 18 cm x 12 cm. Es ist ebenfalls zu beobachten, dass die Messabweichung mit steigender Frequenz zunimmt. Sie ist jedoch mit maximal 12% geringer als bei einer WD von 81 cm. Die maximal detektierbare Frequenz liegt bei 5,7 LP/mm, was einer Auflösung des Systems von 0,175 mm entspricht.

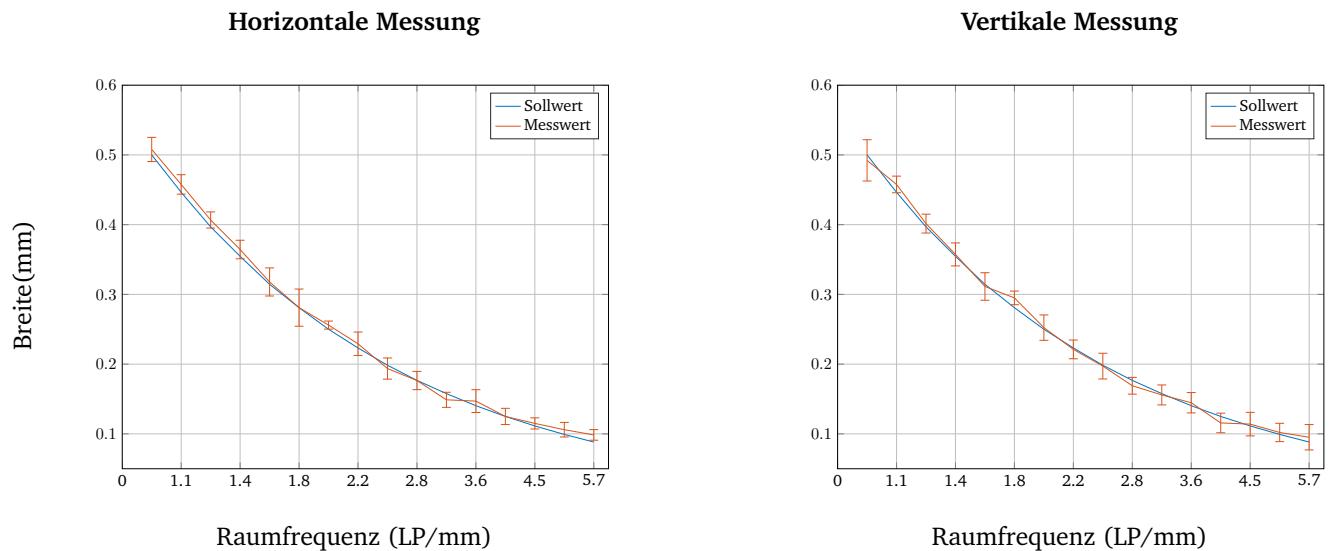


Abbildung 6.7: Messung bei einer Entfernung von 55 cm. Arbeitsbereich 18 cm x 12 cm.

In Abb. 6.8 sind die Messergebnisse bei einer WD von 43 cm zu sehen. Dabei besteht ein FOV von etwa 14 cm x 9 cm. Die Messabweichung beträgt bis 4,5 LP/mm unter 6%. Die maximal detektierbare Frequenz liegt bei 6,3 LP/mm, was einer Auflösung des Systems von 0,159 mm entspricht.

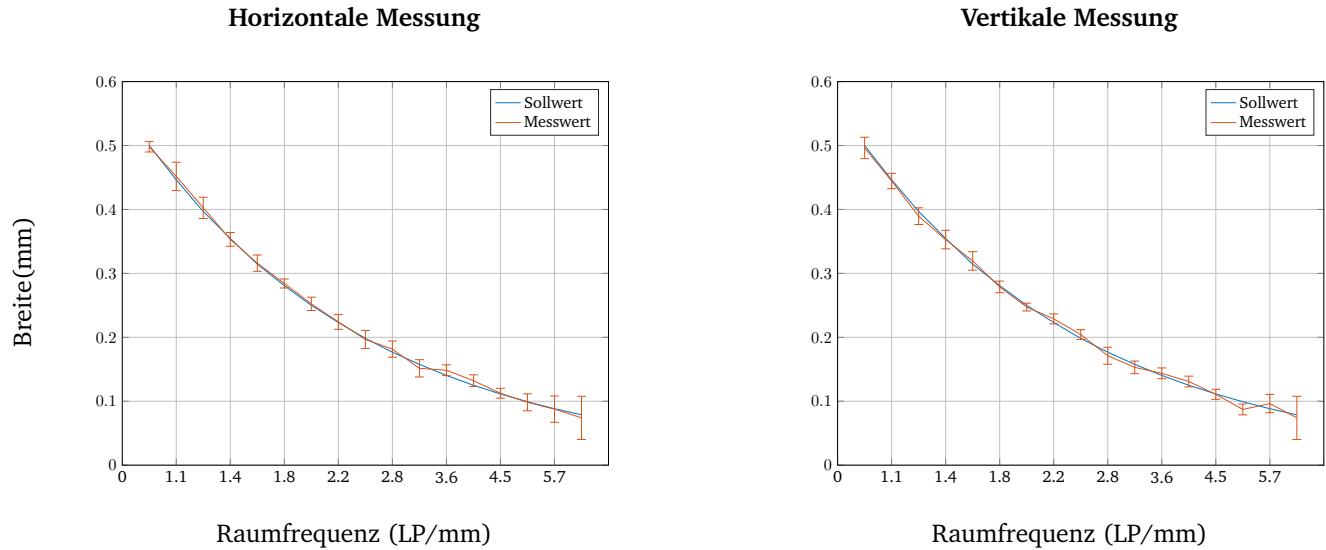


Abbildung 6.8: Messung bei einer Entfernung von 43 cm. Arbeitsbereich 14 cm x 9 cm.

In Abb. 6.9 sind die Messergebnisse bei einer WD von 32 cm zu sehen, was die minimale Fokusdistanz ist. Dabei besteht ein FOV von etwa 11 cm x 7,5 cm. Die Messabweichung beträgt bis 6,3 LP/mm unter 10%. Die maximal detektierbare Frequenz liegt bei 14,7 LP/mm, was einer Auflösung des Systems von 0,068 mm entspricht. Bei der maximal detektierten Frequenz existiert eine Messabweichung von maximal 18%.

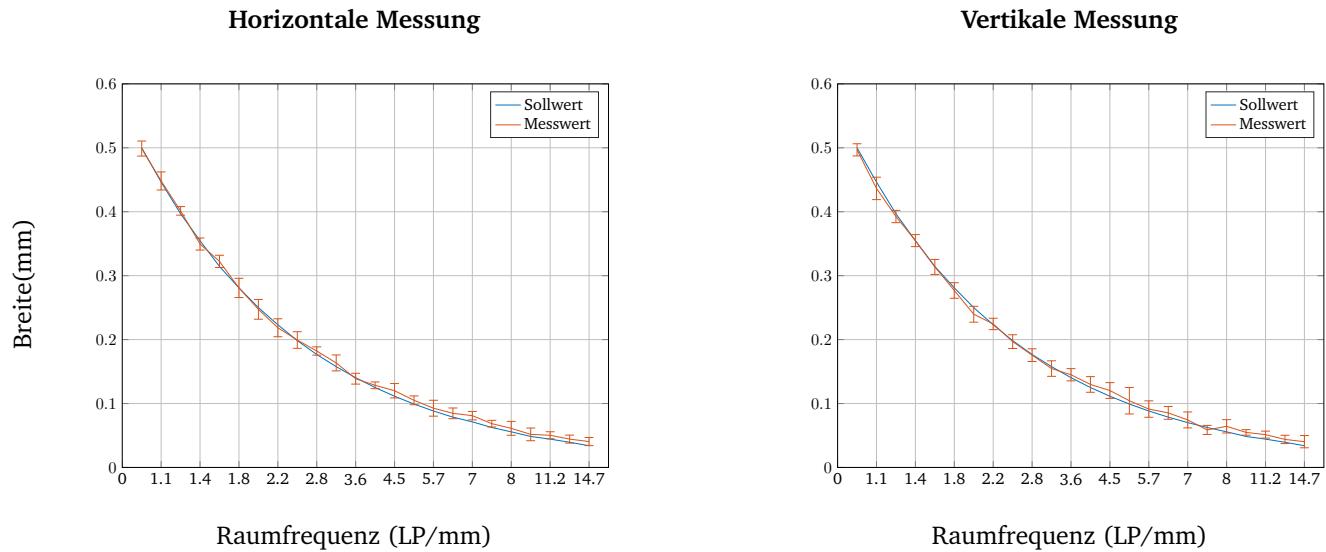


Abbildung 6.9: Messung bei einer Entfernung von 31,9 cm. Arbeitsbereich 11 cm x 7,5 cm.

Allgemein ist zu beobachten, dass das Auflösevermögen des Messplatzes mit steigender WD wie erwartet aufgrund des geringeren Pixel/mm Verhältnis in der Messebene abnimmt. Außerdem ergibt sich bei größerer WD eine größere Standardabweichung der Messwerte.

Aufgrund des variablen Auflösevermögens über den Bildbereich wird ebenfalls eine Messung in den Ecken mittels des USAF-Field Targes erstellt. Es wird, wie in den vorherigen Messungen die Breite der USAF-Elemente gemessen und mit ihrem Sollwert verglichen. In Abb. 6.10 sind die Ergebnisse bei einer WD von 80 cm zu sehen.

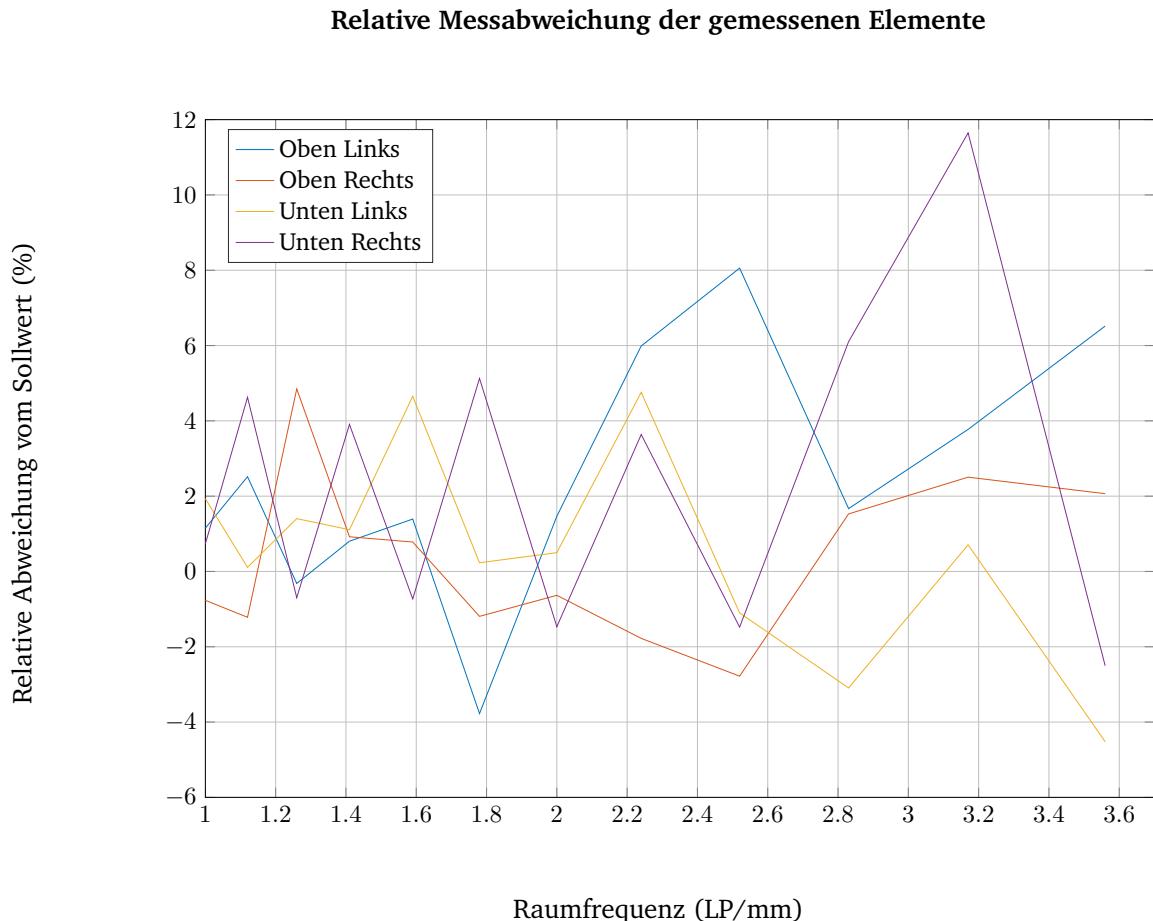


Abbildung 6.10: Messung des USAF Field Targets in den Ecken des Bildbereichs bei einer Distanz von 80 cm.

Es ist eine allgemein steigende relative Abweichung der Messwerte bei höheren Raumfrequenzen zu beobachten. Jedoch kommen bei hohen Raumfrequenzen teilweise auch geringe Abweichungen vor. Dies kann damit zusammenhängen, dass sich an diesen Stellen positive und negative Abweichungen eliminiert haben. Positive Abweichung bedeutet hierbei, dass zu groß gemessen wird.

Mit steigender Raumfrequenz nimmt die durchschnittliche relative Messabweichung zu. Dies kann daran liegen, dass sich der Größenordnung der Auflösung genähert wird und somit der Diskretisierungsfehler zunimmt. Jedoch kommen auch bei hohen Raumfrequenzen noch kleine mittlere Fehler vor. An diesen Stellen ist es möglich, dass sich eine positive und negative Abweichung ausgemittelt haben.

Außerdem ist eine systematische positive Abweichung zu sehen. Im Idealfall sollten die Abweichungen um den Nullpunkt gleichmäßig verteilt sein. Die Linien werden im Mittel also zu lang gemessen. Dies kann beispielsweise an einer Verschiebung aus der Messebene oder einer Ungenauigkeit in der Messung der Referenz liegen.

Abschließend wird der Effekt der Verschiebung aus der Messebene untersucht. Dafür kann mittels Gleichung (4.6) die theoretische Messabweichung ΔG bei einer Verschiebung aus der Messebene um Δg bestimmt werden. Danach kann die erwartete Länge G nach $G = G_0 + \Delta G$ ermittelt werden. Dafür wird die in Gleichung (6.1) bestimmte Brennweite von $f = 103,3$ mm verwendet. G_0 ist hierbei die gemessene Größe ohne Auslenkung von 25,6 mm.

Diese theoretisch berechneten Werte werden in Abb. 6.11 mit den real gemessenen Werten verglichen. Das Objekt wird $n = 10$ mal vermessen und die Fehlerbalken entsprechen dem 95% Konfidenzintervall.

Messung mit Z-Auslenkung

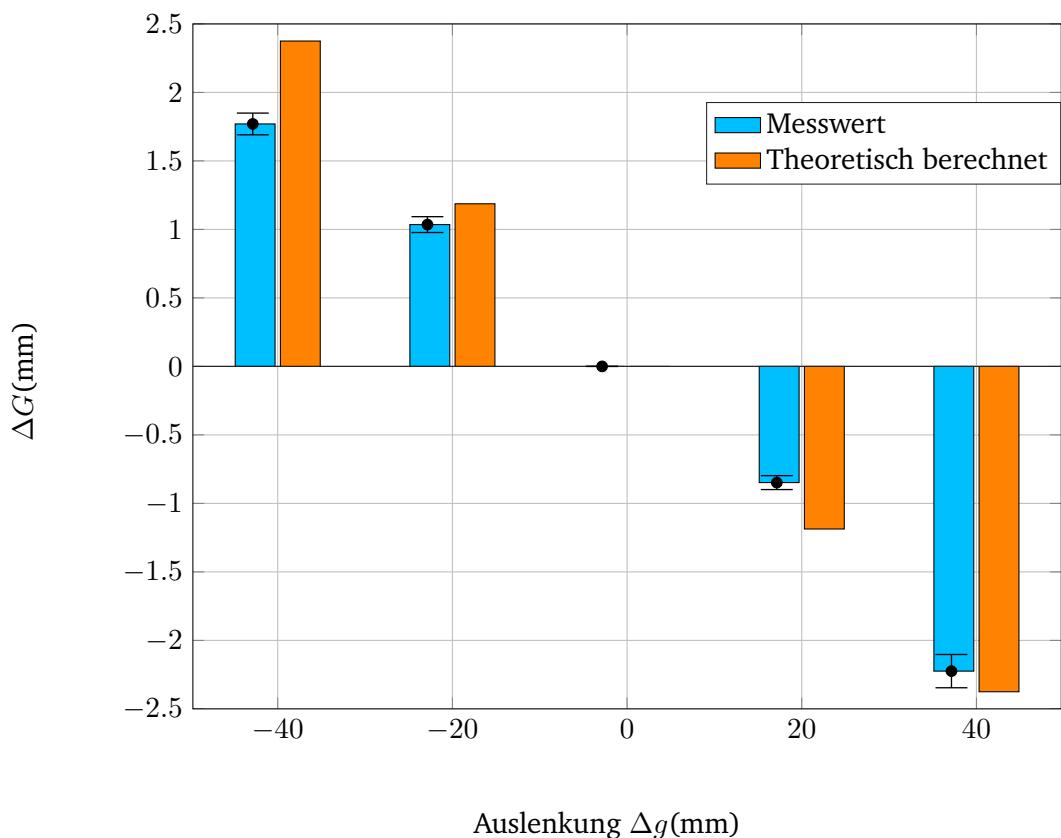


Abbildung 6.11: Messung eines Referenzobjekts mit einer Breite von $G_0 = 25,6$ mm. Aufgetragen ist ΔG . Bei einer Verschiebung näher zur Kamera(-) wird das Objekt zu groß gemessen. Bei Verschiebung weg von der Kamera(+) wird das Objekt zu klein gemessen. Es ist zu erkennen, dass der theoretische Wert bei negativer Verschiebung höher und bei positiver Verschiebung niedriger als die Gemessenen sind.

Es ist zu beobachten, dass die theoretisch berechnete Messabweichung für negative Δg kleiner als die gemessene Abweichung und für positive Δg größer als die gemessene Abweichung ist. Da Δg abhängig von der Brennweite f_{eff} ist, kann dies beispielsweise an einer zu kleinen bestimmten f_{eff} liegen. Mit den gemessenen Werten ergibt sich mittels der Bestimmung des Anstieges durch lineare Regression, f_{eff} zu 125 mm. Diese Differenz kann eventuell durch zu wenige Datenpunkte entstanden sein. Abschließend erklären lässt sich diese Differenz jedoch nicht.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein optisches Messsystem entwickelt, konstruiert und charakterisiert. Die Einflussfaktoren entlang der optischen Messkette wurden zusammengestellt und dementsprechend geeignete Hardware gewählt. Anschließend wurde eine Software zur Kalibrierung und Vermessung implementiert. Anhand des optischen Messsystems wurden der Einfluss von relevanten Parametern der Kalibrierung wie Anzahl an verwendeten Bildern und verwendetes Material untersucht. Die Reduzierung des Reprojection Errors betrug bei einer Kalibrierung mittels Papier Kalibriermuster 76% und mit einem Aluminium Kalibriermuster 87%. Daraus lässt sich folgern, dass sich die Kalibrierung mittels eines Kalibriermusters auf Aluminium besser eignet als eines auf Papier. Die durchschnittliche Messabweichung durch Verzerrung beträgt $\pm 1,65 \mu\text{m}$. Bei kleineren FOV sollte dieser Wert aufgrund der höheren Pixeldichte geringer sein.

Bei der Kamerakalibrierung stellte sich die Frage, wie viele Bilder benötigt werden, um einen geringen Reprojection Error zu erhalten. Es wurde festgestellt, dass mindestens 24 Bilder für die Kalibrierung mittels eines Kalibriermusters auf Aluminium verwendet werden sollten. Dies gilt zumindest für das hier verwendete System und kann bei anderen Systemen abweichen. Die Geschwindigkeit der Minimierung des Reprojection Errors ist dabei abhängig von der Anzahl und Reihenfolge der verwendeten Bilder. Deshalb kann es sinnvoll sein, mehrere Kalibrierungen zu mitteln.

Die internen Kameraparameter des Systems ergaben, dass die effektive Brennweite des Systems 103,3 mm $\pm 1,3 \text{ mm}$ beträgt und somit größer ist als die angegebenen 90mm. Dies kann daran liegen, dass die Brennweite eines Objektives auf das Vollformat normiert ist. Da die effektiv genutzte Sensorfläche jedoch kleiner ist, steigt dadurch die effektive Brennweite.

Die Ergebnisse der Messung ergaben eine Auflösung des Systems von 14,7 LP/mm bzw. $68 \mu\text{m}$ als minimal differenzierbare Distanz bei einer WD von 31,9 cm. Des Weiteren zeigte sich eine zunehmende Messabweichung des Systems bei steigender Raumfrequenz bzw. bei kleineren Strukturen. Die Messung mittels des USAF-1951 Field Targets ergab, dass es eine Tendenz zu positiven Messabweichungen gibt. Dies kann an einer Ungenauigkeit in der Messung der Referenz liegen. Das entwickelte System eignet sich somit für alle Vermessungsaufgaben, die in einer Ebene stattfinden und eine Auflösung von maximal $68 \mu\text{m}$ voraussetzen.

In weiteren Arbeiten könnte untersucht werden, warum die theoretischen Daten der Messabweichung bei Verschiebung aus der Messebene nicht mit den gemessenen Daten übereinstimmen. Dafür könnte man als Erstes prüfen ob dieser Effekt nur mit dem hier verwendeten Objektiv auftritt oder unabhängig davon ist. Anschließend könnten andere Kalibrieralgorithmen angewandt werden, um dies als Ursache auszuschließen. Zusätzlich können weitere Einflussfaktoren wie die Optimierungsparameter des Subpixelalgorithmus auf die Qualität der Kalibrierung untersucht werden. Zudem ist es möglich, den Einfluss der Anzahl an verwendeten Gaußfiltern auf die Lokalisierung der Kanten zu betrachten. Außerdem ist es möglich, das System auf die Anwendung des Video-trackings zu erweitern, was ebenfalls ein wichtiger Bereich in der Computer Vision ist. Tracking wird beispielsweise bei der Verkehrsüberwachung, bei Video gestützten OPs oder in den Bereichen Augmented- und Virtual-Reality benötigt. Dafür könnte das System um eine zusätzliche Kamera erweitert werden, um eine Positionsbestimmung im dreidimensionalen Raum mittels Triangulation zu ermöglichen. Dafür werden beide Kameras gleichzeitig als Gesamtsystem kalibriert [8].

Abbildungsverzeichnis

1.1 Schattenwurfsystem	10
1.2 Lasertriangulation	10
1.3 Filtermethode	11
2.1 Bei Abbildungen einer Kamera gehen die Information über Abstand und Winkel verloren [14].	12
2.2 Das Lochkameramodell	13
2.3 Ein 6x9 Schachbrettmuster	15
2.4 Arten radialer Verzerrungen	17
2.5 Beispielhafte Messergebnisse der Kameraparameter, bestehend aus Mittelwert und Konfidenzintervall [19].	18
2.6 Abtastung mit einem Kamerasensor	19
2.7 Aufbau eines Pixels	20
2.8 Die Bit-Tiefe	21
2.9 Aufbau eines CCD Sensors	22
2.10 Aufbau eines CMOS Sensors	22
2.11 Aufbau eines Kamerasensors mit Bayer Pattern	23
2.12 Zum Fokussieren muss der Abstand zwischen Linse und Sensor angepasst werden	24
2.13 Bei entozentrischen Objektiven ändert sich das Verhältnis aus Gegenstandsgröße(G) und Bildgröße(B) abhängig von der Gegenstandsweite(g).	25
2.14 Vorteile telezentrischer Objektive	26
2.15 Strahlengang bei der chromatischen Aberration	26
2.16 Strahlengang beim Koma Fehler	27
2.17 Strahlengang bei der sphärischen Aberration	28
2.18 Intensität der sphärischen Aberration abhängig vom Ort	28
2.19 Strahlengang beim astigmatischen Fehler	29
2.20 Radiale Barrel und Pincushion Verzerrungen	30

2.21 Sichtbare Kontrastabnahme bei engeren Linienpaaren [43].	31
2.22 Schlechte Differenzierbarkeit bei geringerem Abstand der Linien [43].	31
2.23 Messung der MTF über den Sensorbereich	32
2.24 Darstellungsformen der MTF	32
2.25 Eine beispielhafte MTF	33
2.26 Das USAF-1951 Target	33
2.27 Abtastung einer Kante und Auftragen der Intensitätsfunktion	34
2.28 Ablauf des Slanted-Edge-Algorithmus	35
2.29 Der Test Chart nach ISO12233:2017	36
2.30 Ein Bild mit einseitiger Beleuchtung ohne Diffusionsfilter	37
2.31 Verschiedene Arten der Beleuchtung, die je nach Situation gewählt werden können.	37
2.32 Die diffuse Axialbeleuchtung	38
2.33 Die diffuse Auflichtbeleuchtung	38
 3.1 Test Chart von MTF-Mapper	39
3.2 Das USAF-1951 Field Target	40
3.3 MTF des Zeiss 55 mm.	41
3.4 MTF des Sony 90 mm.	42
3.5 Vergleich Zeiss 50 mm Sony 90 mm mittels 3D Plot	43
3.6 Vergleich der chromatischen Aberration	44
3.7 Prüfung der optimalen Blende	44
3.8 Visualisierung der Schärfentiefe	45
3.9 Charakterisierung des Gesamtsystems	45
 4.1 Die Messkette optischer Systeme	46
4.2 Übersicht der Messunsicherheiten, die das Messergebnis beeinflussen können	48
 5.1 Die Gauß Pyramide	49
5.2 Das räumliche Nyquist Kriterium	50
5.3 Die Subpixeloptimierung der detektierten Referenzpunkte	51
5.4 Detektionierte Eckpunkte werden nach der Subpixel Optimierung im Bild markiert	51
5.5 Ein AruCo Marker	52
5.6 Die Bestimmung des Gradienten eines Bildes	53

5.7	Funktionsweise Kantenerkennungsfilter	53
5.8	Reduktion von Noise durch einen Gaußfilter	54
5.9	Der Canny Edge Detector mit Hysterese	54
5.10	Vermessung einer Platine	55
5.11	Vermessung eines additiv gefertigten Verformungskörpers mit der manuellen und automatischen Messmethode	55
6.1	Anzahl der benötigten Kalibrierbilder mit einem Kalibriermuster auf Papier	56
6.2	Anzahl der benötigten Kalibrierbilder mit einem Kalibriermuster auf Aluminium	57
6.3	Reprojection Error vor der Kalibrierung	58
6.4	Reprojection Error nach der Kalibrierung	58
6.5	CAD Modell der 3D gedruckten Halterung	60
6.6	Messung bei einer Entfernung von 81 cm. Arbeitsbereich 28 cm x 18,5 cm.	61
6.7	Messung bei einer Entfernung von 55 cm. Arbeitsbereich 18 cm x 12 cm.	61
6.8	Messung bei einer Entfernung von 43 cm. Arbeitsbereich 14 cm x 9 cm.	62
6.9	Messung bei einer Entfernung von 31,9 cm. Arbeitsbereich 11 cm x 7,5 cm.	62
6.10	Messung des USAF Field Targets in den Ecken des Bildbereichs bei einer Distanz von 80 cm.	63
6.11	Messung eines Referenzobjekts mit einer Breite von 25,6 mm	64

Tabellenverzeichnis

3.1	Ergebnisse des Vergleichs von Alpha 7R3 und Alpha 7R4	40
3.2	Ergebnisse des Vergleichs von Alpha 7R3 und Alpha 7R4 mit Pixelshift	41
3.3	Ergebnisse des Vergleichs der Objektive	42
6.1	Ermittelte Kameraparameter(Pixel) nach $n = 5$ Kalibrierungen.	59
6.2	Ermittelte Verzerrungsparameter nach $n = 5$ Kalibrierungen.	59
6.3	Gruppen- und Elementnummern des USAF 1951-Targets mit dazu gehöriger Raumfrequenz R	60

Akronyme

ADC Analog Digital Converter.

CCD Charge-Coupled Device.

CMOS Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.

DLT direkten linearen Transformation.

DOF Depth of Field.

ESF Edge Spread Function.

FOV Field of View.

FPS Frames per Second.

GUI Graphical User Interface.

ISO Sensorempfindlichkeit nach der International Organization for Standardization.

JPEG Joint Photographic Experts Group.

LSF Line Spread Function.

Mpix Megapixel.

MTF Modulationstransferfunktion.

MTF50 Raumfrequenz, bei der noch 50% des Maximalkontrasts vorhanden ist.

RAW Rohdaten des Sensors.

ROI Region Of Interest.

SNR Signal to Noise Ratio.

TIFF Tagged Image File Format.

WD Working Distance.

Literatur

- [1] *Warum optische Messtechnik in der Fertigung mächtiger wird.* Produktion, Nov. 2020. URL: <https://www.produktion.de/technik/warum-optische-messtechnik-in-der-fertigung-maechtiger-wird-280.html>.
- [2] *Optische Messtechnik.* TU-Braunschweig. URL: https://iprom.tu-bs.de/lehre/vorlesungen/optische_messtechnik/start.
- [3] *Taktile und optische Messtechnik für die Maßprüfung: Vorteile, Unterschiede und Anwendungsbereiche der beiden Messverfahren.* GOM. URL: <https://www.gom.com/de-de/themen/taktile-und-optische-messtechnik>.
- [4] Gabor Fichtinger S. Kevin Zhou Daniel Rueckert. *Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention.* 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04608-6>.
- [5] *Praktikumsversuch Kamerakalibrierung.* Informatik, Uni Freiburg. URL: https://lmb.informatik.uni-freiburg.de/lectures/praktika_brox/bvpraktikum/BVAnl_kam_kalib.pdf.
- [6] Z. Zhang. „A flexible new technique for camera calibration“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22.11 (2000), S. 1330–1334. DOI: [10.1109/34.888718](https://doi.org/10.1109/34.888718).
- [7] Y. M. Wang, Y. Li und J. B. Zheng. „A camera calibration technique based on OpenCV“. In: *The 3rd International Conference on Information Sciences and Interaction Sciences.* 2010, S. 403–406. DOI: [10.1109/ICICIS.2010.5534797](https://doi.org/10.1109/ICICIS.2010.5534797).
- [8] A. Fetić, D. Jurić und D. Osmanković. „The procedure of a camera calibration using camera Calibration Toolbox for MATLAB“. In: *2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO.* 2012, S. 1752–1757.
- [9] Johannes Bernstein. *Optisches Multi-Sensor-Messverfahren zur dimensionellen in-line Messung von Strangprofilen im Fertigungsprozess.* URL: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/deliver/index/docId/1775/file/Johannes_Bernstein_Dissertation.pdf.
- [10] TECH TALK: Die Vorteile von Lasertriangulation. SenseIT. URL: <https://senseit.nl/tech-talk-das-fuer-und-wider-von-lasertriangulation/>.
- [11] "Computer Vision 1" L4 Edges. VI, TU-Darmstadt.
- [12] Thomas Schops u. a. „Why Having 10,000 Parameters in Your Camera Model Is Better Than Twelve“. In: *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2020), S. 2532–2541.
- [13] J. Warczarek und P. Śniataia. „Camera calibration and object size/distance calculation application“. In: *2017 MIXDES - 24th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems.* 2017, S. 505–508. DOI: [10.23919/MIXDES.2017.8005264](https://doi.org/10.23919/MIXDES.2017.8005264).
- [14] "Computer Vision 1" L2 cameras and Filtering. VI, TU-Darmstadt.
- [15] DIN 1319 (*Grundlagen der Messtechnik*). Deutsches Institut für Normung e. V., Jan. 1995.

- [16] *Camera Calibration and 3D Reconstruction*. OpenCV. URL: https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html.
- [17] "Learning OpenCV" L2 LAN. VI, TU-Darmstadt. 2008.
- [18] E.A. Conrady. *Decentering distortion of lenses*. 1919. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/79.5.384>.
- [19] *Reprojection Error*. The MathWorks, Inc. URL: <https://de.mathworks.com/help/vision/ug/evaluating-the-accuracy-of-single-camera-calibration.html>.
- [20] D. Bradley und W. Heidrich. „Binocular Camera Calibration Using Rectification Error“. In: *2010 Canadian Conference on Computer and Robot Vision*. 2010, S. 183–190. doi: 10.1109/CRV.2010.31.
- [21] *Camera Trends: Where We Are Now and What to Expect in the Near Future*. techbriefs.com. URL: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/supplements/pit/features/articles/37675>.
- [22] *Bildgebungselektronik 101: Auflösung*. Edmund optic. URL: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/imaging/camera-resolution-for-improved-imaging-system-performance/>.
- [23] *Nyquist Grenzwert und Kell Faktor*. Edemund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.de/resource-page/application-notes/imaging/camera-resolution-for-improved-imaging-system-performance/e>.
- [24] *Full Well Capacity*. Baumer. URL: <https://www.baumer.com/es/en/service-support/function-principle/operating-principle-and-features-of-cmos-sensors/a/EMVA1288>.
- [25] *Dunkelrauschen*. Vision-Doctor. URL: <https://www.vision-doctor.com/kamera-grundlagen/sensor-pixel-groessen.html>.
- [26] *Bildgebungselektronik 101: Bit Tiefe*. Edemund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/imaging/camera-resolution-for-improved-imaging-system-performance>.
- [27] *Band Gap Silicone*. TU Wien. URL: <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/palankovski/node/37.html>.
- [28] *Understanding Camera Sensors for Machine Vision Applications*. Edemund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications>.
- [29] *Ortsrauschen*. Stemmer Imaging. URL: <https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/cameras/avt/de/de-Allied-Vision-WhitePaper-CCD-vs-CMOS-0416-KAVT0115-201604.pdf>.
- [30] *Farbsenoren*. Vision-Doctor. URL: <https://www.vision-doctor.com/flaechenkameras/1chip-farbkameras.html>.
- [31] *Human Vision and Color Perception*. olympus-lifescience.com. URL: [https://www.olympus-lifescience.com/de/microscope-resource/primer/lightandcolor/humanvisionintro/#:~:text=When%5C%20fully%5C%20light%5C%2Dadapted%5C%2C%5C%20the,of%5C%20the%5C%20visible%5C%20light%5C%20spectrum\)..](https://www.olympus-lifescience.com/de/microscope-resource/primer/lightandcolor/humanvisionintro/#:~:text=When%5C%20fully%5C%20light%5C%2Dadapted%5C%2C%5C%20the,of%5C%20the%5C%20visible%5C%20light%5C%20spectrum)..)
- [32] en:User:Cburnett. *Own work*. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1496858>.

- [33] *Aberrationen*. Edmund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/optics/comparison-of-optical-aberrations/>.
- [34] *Optic*. Vision-Doctor. URL: <https://www.vision-doctor.com/optik.html>.
- [35] *The Advantages of Telecentricity*. Edmund Optics. URL: [edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/advantages-of-telecentricity/](https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/advantages-of-telecentricity/).
- [36] *Optiken: Telezentrische Objektive*. Stemmer Imaging. URL: <https://www.stemmer-imaging.com/de-de/grundlagen/telezentrische-objektive/>.
- [37] *Optische Fehler*. Vision-Doctor. URL: <https://www.vision-doctor.com/optische-fehler.html>.
- [38] *Chromatische Aberration*. Edmund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/imaging/aberrational-balancing-of-mtf-in-lens-design/>.
- [39] *Koma*. Vision-Doctor. URL: <https://www.vision-doctor.com/optische-fehler/koma-astigmatismus.html>.
- [40] R. Barry Johnson Rudolf Kingslake. *Lens Design Fundamentals (Second Edition)*. 2010. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/spherical-aberration>.
- [41] Paul C. Goodwin. *Methods in Cell Biology*. 2013. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/astigmatism>.
- [42] *Distortion Calculation*. Edmund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/imaging/testing-and-targets/>.
- [43] *MTF*. Vision-Doctor. URL: <https://www.vision-doctor.com/optische-qualitaet/mtf-aufloesung.html>.
- [44] *Planar T* FE 50mm F1.4 ZA*. Sony. URL: <https://www.sony.de/electronics/kamera-objektive/sel50f14z>.
- [45] *Slanted Edge Methode*. Imatest, Feb. 2020. URL: <https://www.imatest.com/docs/sharpness/>.
- [46] ISO12233. Jan. 2017. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12233:ed-3:v1:en>.
- [47] *Beleuchtung*. Edmund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/illumination/choose-the-correct-illumination/>.
- [48] Thomas J. Fellers und Michael W. Davidson. *Blooming*. Hamamatsu. URL: <https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html>.
- [49] Frans van den Bergh. *MTF-Mapper*. URL: <http://mtfmapper.blogspot.com/>.
- [50] *Pixel-Shift-Multi-Aufnahme*. Sony. URL: <https://support.d-imaging.sony.co.jp/support/ilc/psms/ilce7rm3/de/index.html>.
- [51] Moritz Woitelle. *Theory and Limits of Pose Estimation for Augmented Reality Applications*. Nov. 2019.
- [52] C. Harris und M. Stephens. *A Combined Corner and Edge Detector*. 1988.
- [53] "Computer Vision 1" L3 Edges and Image Pyramids. VI, TU-Darmstadt.
- [54] S. Garrido-Jurado u. a. „Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion“. In: *Pattern Recognition* 47.6 (2014), S. 2280–2292. ISSN: 0031-3203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>.

- [55] J. Canny. „A Computational Approach to Edge Detection“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-8.6 (1986), S. 679–698. doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [56] R. Chadda u. a. „Disruptive Force Sensor Based on Laser-based Powder-Bed-Fusion“. In: *2020 IEEE SENSORS*. 2020, S. 1–4. doi: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278934.
- [57] *Kalibermuster aus Aluminium*. calib.io. URL: <https://calib.io/collections/products/products/checkerboard>.
- [58] *Sony a7R IV*. Digital Camera Database. URL: https://www.digicamdb.com/specs/sony_a7r-iv/.
- [59] Sony. URL: <https://www.sony.de/electronics/kamera-objektive/SEL90M28G/specifications>.